



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ

**Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με  
Μπαταρία Ενσωματωμένα σε Ανανεώσιμες  
Πηγές Ενέργειας:  
Βέλτιστος Προγραμματισμός και  
Διαστασιολόγηση Υπολόγισοντας την Αλλοίωση  
της Μπαταρίας.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΚΟΡΝΙΩΤΗ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ  
ΦΙΛΙΠΠΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

**Επιβλέπων:** Αριστείδης Παγουρτζής  
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2024

---





**Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με Μπαταρία  
Ενσωματωμένα σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας:  
Βέλτιστος Προγραμματισμός και Διαστασιολόγηση  
Υπολόγιστοντας την Αλλοίωση της Μπαταρίας.**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΚΟΡΝΙΩΤΗ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ  
ΦΙΛΙΠΠΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ**

**Επιβλέπων:** Αριστείδης Παγουρτζης  
Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....  
Αριστείδης Παγουρτζης  
Καθηγητής

.....  
Δημήτριος Φωτάκης  
Καθηγητής

.....  
Γιώργος Στάμου  
Καθηγητής





Copyright © - All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.  
ΚΟΡΝΙΩΤΗ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ  
ΦΙΛΙΠΠΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ, 2024.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

(Υπογραφή)

.....  
ΚΟΡΝΙΩΤΗ  
ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ  
ΦΙΛΙΠΠΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ  
...



## Περίληψη

---

Στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), η αιολική ενέργεια διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην καθημερινή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Στόχος για τα επόμενα χρόνια είναι να καλυφθεί το 50% της συνολικής ζήτησης από ΑΠΕ. Ωστόσο, η παραγωγή ενέργειας από τέτοιου είδους ΑΠΕ είναι δύσκολο να ρυθμιστεί, με αποτέλεσμα να δημιουργείται συχνά περίσσεια, ή έλλειψη σε σχέση με τα επίπεδα της ζήτησης. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη δυναμική εφαρμογή μπαταριών ως μέθοδος αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας από αιολικούς σταθμούς. Συγκεκριμένα, ερευνούμε τη διαστασιολόγηση των μπαταριών με στόχο τη μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους νέων αιολικών σταθμών, δεδομένου ότι πλέον υπόκεινται σε περικοπές έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο σε προκαθορισμένα επίπεδα και χρονικές ζώνες. Οι μπαταρίες αυτές επιπλέον μπορούν να συνεισφέρουν στην εξομάλυνση της στοχαστικής παραγωγής. Η ανάλυση μας βασίζεται σε ετήσιες χρονοσειρές τιμής ηλεκτρικής ενέργειας στην προηγούμενη αγορά και χρονοσειρές παραγωγής αιολικών σταθμών λαμβάνοντας υπόψη κρίσιμους παράγοντες, όπως τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας. Ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε όχι μόνο επιτυγχάνει τον βέλτιστο προγραμματισμό της μπαταρίας, αλλά λαμβάνει υπόψη την αλλοίωση κατά την χρήση της, καθιστώντας την έρευνά μας ιδιαίτερα ρεαλιστική. Μέσω μίας ανάλυσης ευαισθησίας είμαστε σε θέση να αξιολογήσουμε αν και υπό ποιες προϋποθέσεις η χρήση μπαταριών αποτελεί βιώσιμη επιλογή στην παρούσα ενεργειακή κατάσταση της Ελλάδας.

## **Λέξεις Κλειδιά**

Εφαρμογές Μεγάλης Κλίμακας, ΑΠΕ, Διείσδυση ΑΠΕ, Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας με μπαταρία, Προγραμματισμός Μπαταρίας, Διαστασιολόγηση, Αλλοίωση της μπαταρίας, μπαταρίες Λιθίου



## Abstract

---

In the field of Renewable Energy Sources (RES), wind energy plays a dominant role in the daily production of electricity in Greece. The goal for the coming years is to cover 50% of the total demand from RES. However, the production from such RES is not easily regulated, often resulting in excess or shortage relative to demand levels. In this context, the present thesis focuses on the potential integration of batteries as a method for storing energy produced by wind farms. Specifically, we investigate the sizing with the aim of maximizing the economic benefit of new wind farms, given that they are now subject to energy flow constraints into the grid at predetermined levels and time zones. These batteries can also contribute to smoothing the stochastic production. Our analysis is based on annual time series of electricity prices in the Day-Ahead Market and time series of wind farm production, taking into account critical factors such as battery characteristics. The algorithm we developed not only achieves optimal battery scheduling but also considers battery degradation, making our research particularly realistic. Through a sensitivity analysis, we are able to assess whether and under what conditions the use of batteries is a viable option in the current energy situation in Greece.

### Keywords

Grid Scale Applications, RES penetration, BESS, Battery Scheduling, Sizing, Degradation, Li-ion BESS



*στους γονείς μου*



## Ευχαριστίες

---

Καταρχήν θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτερες ευχαριστίες μου στον Δρ. Χαρίλαο Ακασιάδη για την πολύτιμη καθοδήγησή μέσα από τις πολύωρες συζητήσεις μας, την διαθεσιμότητά του και την ηθική συμπαράσταση. Επίσης ευχαριστώ τον καθηγητή Αριστείδη Παγουρτζή για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ακόμη, ευχαριστώ την εταιρεία International Wind Engineering για την παροχή των δεδομένων αλλά και την καθοδήγησή στην κατανόηση του προβλήματος. Φυσικά, τίποτα δεν θα ήταν εφικτό χωρίς την οικογένειά και τους φίλους μου. Κλείνοντας, θα ήθελα λοιπόν να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στους γονείς μου, Παναγιώτη Κορνιώτη και Μαρίνα Σταυρουλάκη για την στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Αθήνα, Ιούλιος 2024

*ΚΟΡΝΙΩΤΗ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗ  
ΦΙΛΙΠΠΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ*



# Περιεχόμενα

---

<b>Περίληψη</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>Ευχαριστίες</b>	<b>7</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>15</b>
1.1 Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας	15
1.2 Προκλήσεις στην προσπάθεια Διείσδυσης	16
1.3 Εισαγωγή Μπαταριών	17
1.4 Προκλήσεις στην προσπάθεια εισαγωγής μπαταριών	17
1.5 Κριτήριο η Βιωσιμότητα	17
1.6 Συνεισφορά	18
1.7 Διάρθρωση Διπλωματικής	18
<b>2 Προαπαιτούμενα και σχετική δουλειά</b>	<b>21</b>
2.1 Δεδομένα και ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα.	21
2.1.1 Παραγωγή πάρκου	21
2.1.2 Περικοπές Έγχυσης Ενέργειας	22
2.1.3 Πλαφόν (Ceiling)	22
2.1.4 Day Ahead Market (DAM)	22
2.2 Μπαταρία	23
2.2.1 Είδη αποθήκευσης ενέργειας	23
2.2.2 Προγραμματισμός(Scheduling)	23
2.2.3 Διαστασιολόγηση (Sizing)	24
2.2.4 Αλλοίωση της μπαταρίας (Battery degradation)	25
2.2.5 Κόστος	26
2.2.6 Ασφάλεια και αξιοπιστία του συστήματος	26
2.3 Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	27
2.4 Special Ordered Sets (SOSs)	27
2.4.1 Διαφορά μεταξύ εσόδων και κέρδους	28
2.4.2 Πιθανά συμπεράσματα	29
2.5 Σχετική Βιβλιογραφία	29

<b>3 Σχεδιασμός μοντέλου και υλοποίηση</b>	<b>31</b>
3.1 Μαθηματικός Φορμαλισμός MILP . . . . .	31
3.1.1 Προγραμματισμός της μπαταρίας . . . . .	31
3.1.2 Αλλοίωση της μπαταρίας . . . . .	35
3.1.3 Πλήρες μοντέλο . . . . .	40
3.2 Υλοποίηση . . . . .	41
<b>4 Εμπειρική αξιολόγηση και συζήτηση</b>	<b>43</b>
4.1 Παράμετροι . . . . .	43
4.1.1 Διαστασιολόγηση μπαταρίας . . . . .	43
4.1.2 Αλλοίωση μπαταρίας . . . . .	43
4.1.3 Παράμετροι προβλήματος . . . . .	44
4.2 Σύνολο δεδομένων . . . . .	44
4.2.1 Αρχική μορφή Συνόλου Δεδομένων . . . . .	44
4.2.2 Προεπεξεργασία (Preprocessing) . . . . .	45
4.3 Αποτελέσματα . . . . .	45
4.3.1 Σύγκριση Μοντέλων . . . . .	46
4.3.2 Απόσβεση . . . . .	50
4.3.3 Competitive ratio . . . . .	53
<b>5 Επίλογος</b>	<b>55</b>
5.1 Αξιολόγηση Μοντελοποίησης Φθοράς της Μπαταρίας . . . . .	55
5.2 Βιωσιμότητα Επένδυσης . . . . .	55
5.3 Μελλοντική εργασία . . . . .	56
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>59</b>



## Κατάλογος Σχημάτων

---

1.1	Energy Cover for the last month in Greece . . . . .	16
1.2	Energy Cover for the last year in Greece . . . . .	16
1.3	Comparison of energy cover for the last month and last year in Greece . . . . .	16
3.1	Piecewise linearization of Degradation SoC curve . . . . .	37
4.1	Revenue Comparison, Kap, capacity=40, ceiling=150 . . . . .	47
4.2	Degradation Comparison, Kap, capacity=40, ceiling=150 . . . . .	47
4.3	Depreciation Kap, Unaware, Ceiling=200 . . . . .	51
4.4	Depreciation Mel, Unaware, Ceiling=200 . . . . .	51



## Κατάλογος Πινάκων

---

4.1	Model Parameters . . . . .	44
4.2	Models Comparison for 7 days . . . . .	46
4.3	Annual revenue increase rate. Kapoti Dataset, Ceiling=150 . . . . .	48
4.4	Annual revenue increase rate. Kapoti Dataset, Ceiling=200 . . . . .	48
4.5	Annual revenue increase rate. Mellia Dataset, Ceiling=150 . . . . .	48
4.6	Annual revenue increase rate. Mellia Dataset, Ceiling=200 . . . . .	49
4.7	Annual Total Degradation. Mellia Dataset, Ceiling=150 . . . . .	49
4.8	Annual Total Degradation. Mellia Dataset, Ceiling=200 . . . . .	49
4.9	Grant Amount for different costs and capacities of the battery Kapoti Dataset, Ceiling=150 . . . . .	52
4.10	Grant Amount for different costs and capacities of the battery Kapoti Dataset, Ceiling=200 . . . . .	52
4.11	Grant Amount for different costs and capacities of the battery Mellia Dataset, Ceiling=150 . . . . .	53
4.12	Grant Amount for different costs and capacities of the battery Mellia Dataset, Ceiling=200 . . . . .	53
4.13	Competitive ratio for varying forecast horizons . . . . .	53



## Εισαγωγή

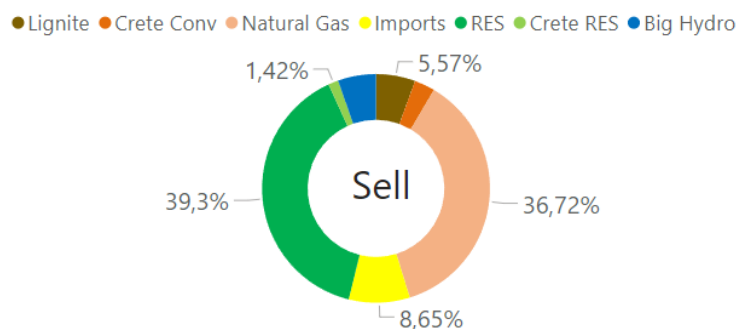
---

### 1.1 Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

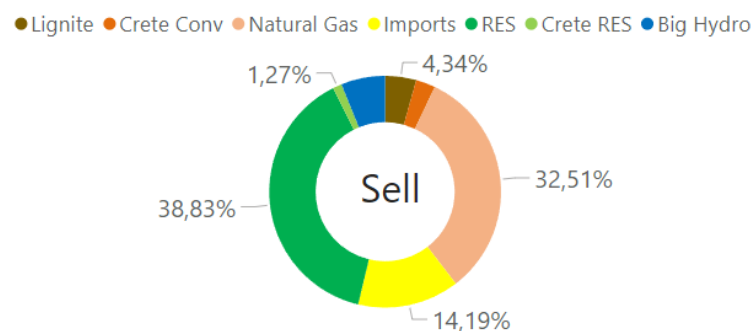
Σε ένα ιδανικό σενάριο, θα μπορούμε να καλύπτουμε τις ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες αποκλειστικά με την χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Στο [1] αναγράφονται οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέχρι το 2030. Με βάση το Clean Energy Package (CEP) γίνεται προσπάθεια μείωσης των εκπομπών στο 40% και αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ στο 32%. Το CEP είναι μια πρωτοβουλία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, υιοθετήθηκε το 2019, και αποτελείται από ένα σύνολο κανονισμών και οδηγιών που στοχεύουν στη διευκόλυνση της μετάβασης από τα ορυκτά καύσιμα προς καθαρότερες πηγές ενέργειας, στο πλαίσιο της ενεργειακής πολιτικής της ΕΕ. Ακόμη, σύμφωνα με την αναφορά από το EMBER, το 2023 οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) παρείχαν το 30% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας για πρώτη φορά. Το EMBER είναι ένας ανεξάρτητος οργανισμός που αναλύει τις παγκόσμιες τάσεις στην παραγωγή ενέργειας και τις εκπομπές ρύπων, εστιάζοντας στην προώθηση της μετάβασης προς καθαρότερες πηγές ενέργειας. Η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη της ηλιακής και αιολικής ενέργειας. Από το 2000, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επεκτάθηκαν από το 19% της παγκόσμιας ηλεκτρικής ενέργειας στο 30% το 2023.

Στην περίπτωση της Ελλάδας, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση στην διείσδυση των ΑΠΕ. Σύμφωνα με τον Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), η Ελλάδα έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για το 2030, εστιάζοντας στην ενίσχυση της διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και στη δραστική μείωση των εκπομπών ρύπων. Το 2023, οι ΑΠΕ κάλυψαν το 57% του ενεργειακού μείγματος, ξεπερνώντας τις 25 TWh, με τη συνολική παραγωγή πράσινης ενέργειας να σημειώνει ρεκόρ δεκαετίας και να φτάνει τις 21,35 TWh, αύξηση 147% από το 2014. Μέχρι το 2030, η Ελλάδα στοχεύει σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών ρύπων και στη συνεχή αύξηση του ποσοστού των ΑΠΕ, επιδιώκοντας μια καθαρότερη και βιώσιμη ενεργειακή πολιτική. Επιπρόσθετα, στα επόμενα διαγράμματα με πράσινο φαίνεται η κάλυψη των ημερήσιων αναγκών του τελευταίου μήνα και του τελευταίου χρόνου από ΑΠΕ, όπως αναρτώνται στο χρηματιστήριο της ενέργειας στην Ελλάδα. Η πλειονότητα των ημερήσιων αναγκών καλύφθηκαν από ΑΠΕ.

Είναι σαφές ότι παρατηρείται μια σημαντική τάση για την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο όσο και στην Ελλάδα. Ωστόσο, η ενίσχυση της διείσδυσης των ΑΠΕ συνοδεύεται από πολλές προκλήσεις.



Σχήμα 1.1: *Energy Cover for the last month in Greece*



Σχήμα 1.2: *Energy Cover for the last year in Greece*

Σχήμα 1.3: *Comparison of energy cover for the last month and last year in Greece*

## 1.2 Προκλήσεις στην προσπάθεια Διείσδυσης

Οι προκλήσεις στην προσπάθεια διείσδυσης συστημάτων ΑΠΕ ποικίλουν[2]. Η βασικότερη έγκειται στην ασταθής παραγωγή των ΑΠΕ. Αν οι καιρικές συνθήκες δεν ευνοούν, ενδέχεται να μην μπορούν να καλυφθούν οι ημερήσιες ανάγκες. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους θα μπορούσαμε να βελτιώσουμε το προφίλ παραγωγής των ΑΠΕ[2]. Επιγραμματικά αναφερόμαστε στην αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος του πάρκου και εισαγωγή μονάδων αποθήκευσης ενέργειας.

Η ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα επιβαρύνεται από το φαινόμενο του κορεσμού λόγω της υπερβολικής εγκατάστασης σταθμών ΑΠΕ. Ως αποτέλεσμα, η εγκατεστημένη ισχύς υπερβαίνει κατά πολύ τις μέσες ημερήσιες ανάγκες, με συνέπεια ότι σε περιόδους υψηλής παραγωγής, η προσφορά υπερβαίνει τη ζήτηση, καθιστώντας το δίκτυο ανίκανο να απορροφήσει την περίσσεια ενέργειας. Για την ενίσχυση της δυνατότητας απορρόφησης ενέργειας από τους σταθμούς ΑΠΕ, έχει θεσπιστεί το ισχύον ρυθμιστικό πλαίσιο, το οποίο επιβάλλει περιορισμούς στην έγχυση ενέργειας στο δίκτυο για τα νέα έργα ΑΠΕ, με συγκεκριμένα επίπεδα και χρονικές ζώνες. Οι ακριβείς περιορισμοί θα αναλυθούν κατά την ανάπτυξη του αλγορίθμου και θα παρουσιαστούν λεπτομερώς στο 2.1.2.

### 1.3 Εισαγωγή Μπαταριών

Στην προσπάθεια να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις με σκοπό την αύξηση της διείσδυσης ΑΠΕ, εξετάζουμε τη δυνατότητα ενσωμάτωσης μπαταριών ως μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Η χρήση μπαταριών αναμένεται να συμβάλει στην εξομάλυνση της απρόβλεπτης συμπεριφοράς των ΑΠΕ, βελτιώνοντας έτσι τη δυνατότητα σταθερής έγχυσης ενέργειας στο δίκτυο. Επιπλέον, οι μπαταρίες μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση των περιορισμών της έγχυσης ενέργειας, καθώς θα επιτρέπουν την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής και την πώλησή της κατά τις ώρες υψηλότερης ζήτησης. Από οικονομική άποψη, η αποθήκευση ενέργειας σε ώρες χαμηλότερης χρηματιστηριακής τιμής και η "αναδρομολόγηση" της έγχυσης σε ώρες υψηλότερης τιμής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά οφέλη. Ενσωματώνοντας αυτές τις στρατηγικές, αναμένεται ότι η χρήση μπαταριών θα βελτιώσει τη συνολική αποδοτικότητα και οικονομικότητα του ενεργειακού συστήματος.

### 1.4 Προκλήσεις στην προσπάθεια εισαγωγής μπαταριών

Η ενσωμάτωση μπαταριών στο ενεργειακό σύστημα συνεπάγεται την αντιμετώπιση αρκετών προκλήσεων[3]. Ειδικότερα, στην παρούσα διπλωματική εστιάζουμε, στον προγραμματισμό και την αλλοίωση της μπαταρίας. Ωστόσο, μία ιδιαίτερα σημαντική πρόκληση από μηχανολογικής σκοπιάς, αφορά τον τρόπο διαχείρισης του BESS [4], [5].

Σχετικά με τη διαστασιολόγηση, απαιτείται η ανάλυση πολλών παραγόντων, όπως το κόστος εισαγωγής, ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών τους, η διαχείριση του κύκλου ζωής τους, καθώς και η ασφάλεια και η αξιοπιστία του συστήματος. Αυτά τα στοιχεία είναι κρίσιμα για την εξασφάλιση της αποδοτικότητας, της μακροχρόνιας λειτουργίας των μπαταριών αλλά και τον συντονισμό τους με τα πάρκα.

Αντίστοιχα, ο προγραμματισμός της μπαταρίας περιλαμβάνει τον καθορισμό στρατηγικών φόρτισης και αποφόρτισης, με σκοπό την σκοπό την μεγιστοποίηση των εσόδων. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναπτύσσουμε έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης που επιδιώκει την βέλτιστο προγραμματισμό της μπαταρίας λαμβάνοντας υπόψη την αλλοίωσή της, εξασφαλίζοντας την ορθή χρήση της για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

### 1.5 Κριτήριο η Βιωσιμότητα

Η αξιολόγηση του κατά πόσο η εισαγωγή μπαταριών σε ΑΠΕ αποτελεί υποσχόμενη επένδυση βασίζεται κυρίως στη βιωσιμότητά της. Η βιωσιμότητα εξετάζει αν η επένδυση μπορεί να αποφέρει σταθερά κέρδη και να είναι οικονομικά αποδοτική μακροπρόθεσμα. Κρίσιμα κριτήρια για την αξιολόγηση περιλαμβάνουν το αρχικό κόστος αγοράς, την απόδοση της μπαταρίας και τον χρόνο ζωής της, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Η δυνατότητα της μπαταρίας να μειώσει τις απώλειες ενέργειας και να βελτιώσει την αξιοποίηση των ΑΠΕ, αυξάνοντας την ενεργειακή απόδοση του συστήματος, είναι επίσης καθοριστικός παράγοντας. Συνολικά, αν η εισαγωγή μπαταριών μπορεί να μειώσει τα λειτουργικά κόστη και να

προσφέρει μια θετική καθαρή παρούσα αξία, η επένδυση θεωρείται βιώσιμη και συνεπώς υποσχόμενη.

## 1.6 Συνεισφορά

Η εισαγωγή μπαταριών σε συστήματα ΑΠΕ με στόχο την διείσδυση τους έχει απασχολήσει ιδιαίτερα την ερευνητική κοινότητα[6]. Οι μέθοδοι με τις οποίες έχει προσεγγιστεί η λύση του προβλήματος ποικίλουν ενώ η μέθοδος του Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (Μ.Α.Γ.Π), που εφαρμόζουμε, προτιμάται από την πλειονότητα. Είναι συνεπώς απαραίτητο να παρουσιάσουμε τις δικές μας συνεισφορές, οι οποίες δικαιολογούν την επιλογή μας να εστιάσουμε σε αυτό το θέμα :

- Παρούσα ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα. Η μελέτη μας εστιάζει στην τρέχουσα ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα. Ως εκ τούτου, τα συμπεράσματά μας είναι άμεσα εφαρμόσιμα στην παρούσα χρονική συγκυρία.
- Παρούσα τεχνολογική κατάσταση παγκοσμίως. Η έρευνά μας βασίζεται στις τρέχουσες τιμές της αγοράς σχετικά με το κόστος των μπαταριών, λαμβάνοντας υπόψη την υπάρχουσα τεχνολογική κατάσταση παγκοσμίως.
- Αναπτύξαμε έναν αλγόριθμο διαχείρισης της μπαταρίας από την αρχή. Αντλώντας πληροφορίες από τη βιβλιογραφία, δημιουργήσαμε τον θεωρητικό φορμαλισμό και υλοποιήσαμε το μοντέλο μας από το μηδέν. Με αυτόν τον τρόπο, διαθέτουμε πλήρη γνώση και κατανόηση όλων των παραμέτρων και της λειτουργίας του μοντέλου μας.
- Ο αλγόριθμος επιτυγχάνει την βέλτιστη διαχείριση της μπαταρίας (προγραμματισμός) στον χρονικό ορίζοντα που υλοποιείται (τυπικά μία ημέρα) ενώ λαμβάνει υπόψη την αλλοίωσή της. Η αλλοίωση της μπαταρίας έχει μοντελοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε ο αλγόριθμος επιτυγχάνει το βέλτιστο οικονομικό όφελος, βρίσκοντας την ισορροπία μεταξύ ελαχιστοποίησης του κόστους χρήσης και μεγιστοποίησης των εσόδων.
- Διεξήχθη εμπειρική αξιολόγηση βάσει της προγραμματιστικής υλοποίησής μας συνδυάζοντας δεδομένα από τον πραγματικό κόσμο. Τα αποτελέσματα επιδεικνύουν την εφαρμοστικότητα της μεθόδου μας.

## 1.7 Διάρθρωση Διπλωματικής

Σε αυτή την ενότητα περιγράψουμε τι ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια. Στο κεφάλαιο 2 δίνουμε τα προαπαιτούμενα για να μπορέσει να κατανοήσει κανείς το πρόβλημα. Συγκεκριμένα, διατυπώνεται η τωρινή ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα. Χαρακτηριστικά, γίνεται αναφορά στην Αγορά Επόμενης Ημέρας (Day-Ahead Market, DAM), στην παραγωγή του πάρκου και εξηγούμε την ορολογία που χρειάζεται να γνωρίζει κανείς για τις μπαταρίες. Ακόμη, περιγράφουμε τον αλγόριθμο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού, τον οποίο θα χρησιμοποιήσουμε, και πώς αυτός βρίσκει εφαρμογή στο πρόβλημά μας. Αφού θα



έχουμε εξηγήσει τα παραπάνω, θα είμαστε σε θέση να κατανοήσουμε την ανάγκη για εφαρμογή Γραμμικοποίησης κατά διαστήματα (Piecewise Linearization) μίας συνάρτησης. Ολοκληρώνοντας με τα προαπαιτούμενα, κάνουμε μία αναδιατύπωση του προβλήματος έχοντας πλέον εξηγήσει την ορολογία που απαιτείται. Τέλος, κάνουμε σύγκριση με προηγούμενες εργασίες σχετικές με το θέμα.

Συνεχίζοντας στο Κεφάλαιο 3, μοντελοποιούμε το σύστημα του Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (ΜΑΛΠ) και το υλοποιούμε. Όσον αφορά την μοντελοποίηση, παραθέτουμε πλέον ξεκάθαρα το πως επιτυγχάνουμε τον προγραμματισμό και την αλλοίωση της μπαταρίας. Και στις δύο περιπτώσεις εξηγούμε πως καλύπτεται ο κάθε περιορισμός και δίνουμε το εκάστοτε ΜΑΛΠ. Όσον αφορά την υλοποίηση, αναφερόμαστε σε τεχνικά ζητήματα όπως την γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήσαμε για να εκτελέσουμε τα πειράματά μας (python).

Προχωρώντας στο Κεφάλαιο 4, κάνοντας χρήση του αλγορίθμου επίλυσης του μοντέλου και εφαρμόζουμε ανάλυση ευαισθησίας στις παραμέτρους του προβλήματος ώστε να εξάγουμε τα συμπεράσματά μας. Αρχικά, διατυπώνουμε όλες τις παραμέτρους του μοντέλου. Ακόμη, εξηγούμε τα σύνολα δεδομένων τα οποία χρησιμοποιούμε πάνω στα οποία εκτελούμε την έρευνά μας όπως και την προεπεξεργασία που χρειάστηκαν. Έχοντας λοιπόν, δώσει τα δεδομένα και τις παραμέτρους του αλγορίθμου, προχωράμε στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, συγκρίνουμε την επίδοση των δύο μοντέλων μέσω διαφόρων πειραμάτων για διαφορετικούς χρονικούς ορίζοντες. Στην συνέχεια, δίνουμε απάντηση στο κεντρικό ερωτήματα περί βιωσιμότητας της επένδυσης, κάνοντας ένα ετήσιο απολογισμό. Όπως θα διαπιστώσουμε, με την παρούσα ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα αλλά και με το κόστος που έχουν οι μπαταρίες σήμερα, δεν επιτυγχάνεται η αποσβεση. Για τον λόγο αυτό μελετάμε τις συνθήκες κάτω από τις οποίες η επένδυση θα μπορούσε γίνει βιώσιμη. Ειδικότερα, βρίσκουμε το ύψος της επιχορήγησης που θα απαιτούνταν επί του αρχικού κόστους της μπαταρίας.

Κλείοντας στο κεφάλαιο 5, εκφράζουμε συγκεντωμένα τα συμπεράσματα από την έρευνά μας και αναφερόμαστε σε πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας μας.



## Κεφάλαιο 2

# Προαπαιτούμενα και σχετική δουλειά

---

Όπως είδαμε στο Εισαγωγικό κεφάλαιο, η εισαγωγή μπαταριών σε πάρκα ΑΠΕ δεν αποτελεί εύκολο εγχείρημα. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσουμε το απαραίτητο υπόβαθρο και τις γνώσεις που απαιτούνται για την κατανόηση του προβλήματος, ώστε να προχωρήσουμε στη λύση του στο Κεφάλαιο 3. Αρχικά, εξηγούμε τη μορφή των δεδομένων και τους περιορισμούς που επιβάλλει η παρούσα ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα.

## 2.1 Δεδομένα και ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα.

### 2.1.1 Παραγωγή πάρκου

Για να καθορίσουμε τη βέλτιστη στρατηγική χρήσης της μπαταρίας σε αιολικά ή φωτοβολταϊκά πάρκα, απαιτείται γνώση σχετικά με την παραγωγή ενέργειας του πάρκου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα δεδομένα παραγωγής έχουν δοθεί εκ των προτέρων. Συγκεκριμένα, έχουμε στη διάθεσή μας την παραγωγή διαφορετικών πάρκων για διάστημα ενός έτους (από 01-08-2022 έως 01-08-2023) με χρονικό βήμα μίας ώρας. Την παραγωγή ενέργειας τη μετράμε σε Μεγαβατώρες (MWh), ενώ η ισχύς μετριέται σε Μεγαβάτ (MW). Η τιμή που αναγράφεται σε κάθε κελί των δεδομένων υποδεικνύει την μέση ισχύ που είχε το πάρκο την τελευταία ώρα, μετρημένη σε MW. Συνεπώς, η ενέργεια που παράγει το πάρκο σε μία ώρα προκύπτει από την μέση ισχύ εκείνης της ώρας. Η ισχύς είναι ο ρυθμός με τον οποίο παράγεται ή καταναλώνεται ενέργεια, ενώ η ενέργεια είναι το σύνολο της παραγόμενης ή καταναλωμένης ισχύος σε ένα χρονικό διάστημα.

Η αρχική μορφή στην οποία λάβαμε τα δεδομένα δεν ήταν όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Πραγματοποιήθηκε προεπεξεργασία (preprocessing) των δεδομένων για να αντιμετωπιστούν μικρές ασυνέπειες που υπήρχαν στην αρχική τους μορφή. Για παράδειγμα, υπήρχαν ελλείπουσες καταγραφές και λανθασμένες τιμές. Αναλυτικές πληροφορίες για τη διαδικασία αυτή θα παρατεθούν στο 4.2.2.

Τέλος, όπως αναφέραμε παραπάνω, η παραγωγή θεωρήθηκε δεδομένη για την κατασκευή του αλγορίθμου διαχείρισης της μπαταρίας. Για μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση, προτείνεται η χρήση αλγορίθμων πρόβλεψης της παραγωγής ενέργειας. (forecasting). [7], [8]

### 2.1.2 Περικοπές Έγχυσης Ενέργειας

Οι περικοπές έγχυσης ενέργειας επηρεάζουν την διάθεση παραγόμενης ενέργειας του πάρκου στο δίκτυο. Εφαρμόζονται σαν ποσοστό επί της εγκατεστημένης ισχύος του πάρκου. Ένα παράδειγμα εφαρμογής περικοπής είναι το επόμενο. Για τα αιολικά πάρκα ώρα 10πμ έχει εφαρμοστεί ποσοστό τάξης 80%. Υποθέτοντας ότι αναφερόμαστε σε πάρκο με εγκατεστημένη ισχύ 40MW, η έγχυσή του στο δίκτυο δεν μπορεί να ξεπερνάει τις  $40 \cdot 0.8 = 32MWh$ .

Οι περικοπές διαφέρουν ανάλογα με το είδος του πάρκου (αιολικού ή φωτοβολταϊκού). Για τα φωτοβολταϊκά πάρκα, το ποσοστό είναι σταθερό για όλες τις ώρες της ημέρας στο 0.72 ενώ για τα αιολικά διαφέρουν ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Ο παρακάτω πίνακας δίνει αναλυτικά το ποσοστό περικοπής ανάλογα με τις ώρες της ημέρας για τα αιολικά πάρκα.

Ώρες	Περικοπές
9πμ-11πμ	80%
11πμ-3μμ	65%
3μμ-5μμ	80%

Τις υπόλοιπες ώρες μέσα στην ημέρα δεν υπάρχει περικοπή.

### 2.1.3 Πλαφόν (Ceiling)

Το πλαφόν στα έσοδα ηλεκτροπαραγωγών είναι ένα ρυθμιστικό μέτρο που θέτει ανώτατο όριο στα κέρδη που μπορούν να αποκομίσουν οι εταιρείες από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το μέτρο θεσπίζεται για να προστατεύσει τους καταναλωτές από υπερβολικές τιμές, να διασφαλίσει δίκαιους όρους ανταγωνισμού στην αγορά ενέργειας και να ενθαρρύνει τις επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το πλαφόν βοηθά στη ρύθμιση των τιμών και στην αποτροπή της υπερβολικής κερδοσκοπίας, προάγοντας έτσι μια πιο ισότιμη και βιώσιμη ενεργειακή αγορά. Για την περίοδο που αφορούν τα δεδομένα μας, το πλαφόν βρισκόταν στα 85(€/Mwh). Με το επόμενο παράδειγμα, υποδεικνύουμε τον τρόπο εφαρμογής του πλαφόν. Αν η ενέργεια την δεδομένη ώρα βρίσκεται στα 100(€/Mwh), βάσει το DAM, οι παραγωγοί ΑΠΕ αποκομίζουν 85(€/Mwh) (για πλαφόν στα 85). Αντίθετα, αν η παραγωγή έχει χαμηλότερη τιμή από το πλαφόν, οι παραγωγοί αποκομίζουν αυτή την τιμή.

### 2.1.4 Day Ahead Market (DAM)

Η αγορά επόμενης ημέρας (DAM) επιτρέπει στους προμηθευτές και καταναλωτές ενέργειας να αγοράσουν και να πουλήσουν ηλεκτρική ενέργεια με υποχρέωση φυσικής παράδοσης την επόμενη ημέρα. Αυτή η αγορά διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των τιμών της ενέργειας και στη διαχείριση του ηλεκτρικού δικτύου. Η διαμόρφωση των τιμών εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως η προσφορά των παραγωγών, η προβλεπόμενη ζήτηση, και η διαθεσιμότητα πόρων. Το μοντέλο που είναι υπεύθυνο για την διαμόρφωση των τιμών ονομάζεται Target Model.

Η αγορά προηγούμενης ημέρας παρέχει στους συμμετέχοντες τις πληροφορίες που χρειάζονται για να λάβουν αποφάσεις σχετικά με την αγοραπωλησία ενέργειας για την επόμενη

ημέρα. Συγκεκριμένα, κάθε μεσημέρι δημοσιεύονται οι ωριαίες τιμές αγοραπωλησίας της ενέργειας για την επόμενη ημέρα. Ο αλγόριθμος που κατασκευάζουμε εκτελείται σε βάθος μία ημέρας και ένα από τα δεδομένα είναι οι ωριαίες τιμές αγοραπωλησίας της ενέργειας για εκείνη την ημέρα, οι οποίες ατνλούνται από το DAM.

Το Target Model είναι ένα πλαίσιο ρυθμίσεων για την ενοποίηση και βελτίωση της λειτουργίας της ενεργειακής αγοράς. Χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση των τιμών αγοραπωλησίας στην ΕΕ. Στόχος του είναι η δημιουργία μιας ενιαίας και αποτελεσματικής ενεργειακής αγοράς στην Ευρώπη, που θα προάγει την ανταγωνιστικότητα, τη διαφάνεια και την αποτελεσματικότητα του δικτύου. Το Target Model περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός ενιαίου αγοραστικού χώρου, τον συγχρονισμό των διαδικασιών διασύνδεσης και τη βελτίωση της διαχείρισης των αγορών ενέργειας. Η εφαρμογή του γίνεται μέσω κοινών κανόνων και διαδικασιών σε όλες τις εθνικές ενεργειακές αγορές της ΕΕ, με στόχο την ενοποίηση και τον εκσυγχρονισμό του ευρωπαϊκού ενεργειακού τομέα.

## 2.2 Μπαταρία

Στην συνέχεια, εξηγούμε το υπόβαθρο σχετικό με την μπαταρία. Ειδικότερα, παρουσιάζουμε τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας, το κόστος της και την συσχέτιση της μπαταρίας με τους στόχους μας.

### 2.2.1 Είδη αποθήκευσης ενέργειας

Πριν αναπτύξουμε το απαραίτητο υπόβαθρο για την κατανόηση του προβλήματος σχετικά με τις μπαταρίες, σημειώνουμε ότι υπάρχουν διάφοροι τρόποι αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Systems, ESS). Συγκεκριμένα, οι μπαταρίες ανήκουν στα ηλεκτροχημικά συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (Electrochemical ESS). Παραδείγματα διαφορετικών ESS περιλαμβάνουν τα υδροηλεκτρικά, χημικά, θερμικά και άλλα[9], καθένα από τα οποία επιλέγεται ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε προβλήματος. Η βιβλιογραφία παρέχει εκτενή ανάλυση σχετικά με τα διάφορα ESS και τις εφαρμογές τους[10].

Για τις εφαρμογές μεγάλης κλίμακας(Grid-Scale Applications), συγκεκριμένα, οι μπαταρίες λιθίου (Li-ion) και οι lead-acid είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες. Η επιλογή μας για το πρόβλημά μας θα είναι η μπαταρία Λιθίου, λόγω της ευρείας χρήσης της τα τελευταία χρόνια και της υποστηρικτικής βιβλιογραφίας που την επικροτεί. [11], [5]

### 2.2.2 Προγραμματισμός(Scheduling)

Ο προγραμματισμός της μπαταρίας αναφέρεται στη στρατηγική διαχείριση των δραστηριοτήτων φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας για την μεγιστοποίηση των εσόδων. Μέσω του αποτελεσματικού προγραμματισμού, οι μπαταρίες μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση των προβλημάτων αστάθειας που σχετίζονται με τις ΑΠΕ, να βελτιώσουν τη σταθερότητα του δικτύου και να μεγιστοποιήσουν την οικονομική βιωσιμότητα των αιολικών πάρκων.

Η μεγιστοποίηση των εσόδων επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της εφαρμογής δύο στρατηγικών. Πρώτον, με την αποθήκευση ενέργειας όταν υπάρχει περίσσεια στην παραγωγή και

διαθέσιμος χώρος αποθήκευσης. Για παράδειγμα, κατά τις ώρες που εφαρμόζονται οι περιοχές έγχυσης, η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να υπερβαίνει το επιτρεπόμενο ποσό που μπορεί να εγχυθεί στο δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση, είναι επιθυμητό να αποθηκεύουμε την περίσσεια ενέργεια στην μπαταρία. Δεύτερον, επιτυγχάνοντας την πώληση της αποθηκευμένης ενέργειας σε υψηλότερη τιμή σε σύγκριση με την τιμή κατά την οποία αποθηκεύτηκε. Συγκεκριμένα, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να πωληθεί κατά τις ώρες αιχμής, όταν η ζήτηση είναι υψηλή και οι τιμές είναι αυξημένες, μεγιστοποιώντας έτσι τα έσοδα από την πώλησή της.

Επιτυγχάνοντας έναν ικανοποιητικό προγραμματισμό της μπαταρίας, μπορούμε να ανταποκριθούμε στο κεντρικό ερώτημα της βιωσιμότητας. Συνεπώς, ο προγραμματισμός της μπαταρίας αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της διεξαγωγής της μελέτης μας. Περαιτέρω λεπτομέρειες για την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρέχονται στα Κεφάλαια 4 και 5.

### 2.2.3 Διαστασιολόγηση (Sizing)

Η κατάλληλη διαστασιολόγηση της μπαταρίας αποτελεί ένα επιπλέον κρίσιμο στοιχείο κατά την ενσωμάτωση των μπαταριών σε έργα ΑΠΕ. Μια λανθασμένη διαστασιολόγηση μπορεί να οδηγήσει σε ανεπάρκεια ή υπερβολική χρήση της μπαταρίας, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής της και τη μείωση της αποδοτικότητας του συστήματος συνολικά. Έτσι, η ορθή διαστασιολόγηση αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την αποτελεσματική και βιώσιμη λειτουργία των συστημάτων ΑΠΕ.

Με τον όρο διαστασιολόγηση, αναφερόμαστε κυρίως στην χωρητικότητα της μπαταρίας (capacity), ενώ θα μας απασχολήσουν και ο ρυθμός (απο)φόρτισης (ratings), οι απώλειες κατά την χρήση της και το βάθος αποφόρτισης (Depth of Discharge, DoD). Ακόμη, το κόστος και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπορούν να θεωρηθούν χαρακτηριστικά σχετικά με την διαστασιολόγηση της μπαταρίας αλλά αναλύονται ξεχωριστά.

Η χωρητικότητα μίας μπαταρίας αφορά την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει και μετριέται συνήθως σε watt-ώρες (Wh) ή μεγαβάτ-ώρες (MWh). Το γεγονός ότι μία μπαταρία έχει αποθηκευμένη μία ποσότητα ενέργειας δεν συνεπάγεται ότι μπορεί και να την αποδώσει άμεσα. Η διαθέσιμη ενέργεια που μπορεί να αποδώσει δίνεται από τον ρυθμό απόφορτισης. Ο ρυθμός φόρτισης της μπαταρίας μετριέται συνήθως σε κιλοβάτ (kW) ή μεγαβάτ (MW) και καθορίζεται την ισχύ που μπορεί να παρέχει σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Με την ίδια λογική ορίζεται και ο ρυθμός φόρτισης. Οι απώλειες μιας μπαταρίας αναφέρονται στην ενέργεια που χάνεται κατά τη διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης λόγω θερμικών, ηλεκτρικών και χημικών διεργασιών. Υπολογίζονται ως ποσοστό επί της ενέργειας που εισέρχεται ή εξέρχεται από τη μπαταρία. Τέλος, το μέγεθος της αποφόρτισης αφορά το ποσό που αντλείται από μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία και μετριέται συνήθως σε ποσοστό. Για παράδειγμα μία μπαταρία με χωρητικότητα 10MWh που είναι πλήρως φορτισμένη και αποφορτίζεται μέχρι τις 2MWh έχει υποστεί  $DoD = 80\%$ .

$$DoD = \frac{SoC}{capacity} \cdot 100$$

Τέλος, υπάρχουν και άλλοι όροι σχετικοί με την διαστασιολόγηση μπαταριών, οι οποίοι

δεν θα εξεταστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Ορισμένοι από αυτούς περιλαμβάνουν την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας (Ohm), την θερμοκρασία λειτουργίας της και τον χρόνο απόκρισής της.

#### 2.2.4 Αλλοίωση της μπαταρίας (Battery degradation)

Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα βιβλιογραφίας και παραγόντων που μπορούν να ληφθούν υπόψη σχετικά με την κατάλληλη χρήση μιας μπαταρίας με στόχο τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της[12]. Σε αυτή την ενότητα, θα διευκρινίσουμε τι είναι η αλλοίωση της μπαταρίας, πως μετριέται και ποιοι είναι παράγοντες που την επηρεάζουν.

Με τον όρο αλλοίωση της μπαταρίας εννοούμε την μείωση της χωρητικότητάς της. Για να μπορέσουμε να εξηγήσουμε τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται χρειαζόμαστε τους εξής όρους:

- Κατάσταση υγείας της μπαταρίας (State of Health, SoH).
- Τέλος ζωής μπαταρίας (End of Life, EoL)
- Κανονικοί και Ακανόνιστοι Κύκλοι (Regular and Irregular cycles)
- Αλλοίωση ανά κύκλο (degradation per cycle)

Η **κατάσταση υγείας της μπαταρίας** είναι ένα ποσοστό της τρέχουσας χωρητικότητας της μπαταρίας προς την αρχική χωρητικότητα της μπαταρίας.

$$\text{SoH} = \frac{\text{Current Capacity}}{\text{Initial Capacity}} \cdot 100$$

Η αλλοίωση λοιπόν που έχει υποστεί μία μπαταρία ορίζεται ως 100-SoH. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ότι έχουμε μία μπαταρία που είχε αρχική χωρητικότητα 10MWh και μετά από ένα χρόνο υπέστη 10% αλλοίωση, η τωρινή χωρητικότητά της μπαταρίας είναι 9MWh.

Το **τέλος της ζωής** μίας μπαταρίας (End of Life, EoL συμβαίνει όταν το SoH της μπαταρίας μειωθεί χαμηλότερα από ένα προκαθορισμένο ποσοστό. Ο προσδιορισμός του SoH που θα επιστημάνει το EoL, εξαρτάται πλήρως από την εφαρμογή. Στην περίπτωση των εφαρμογών μεγάλης κλίμακας, η βιβλιογραφία κάνει λόγο για EoL όταν η μπαταρία πέσει χαμηλότερα από  $\text{SoH} \leq 80\%$ [13] [13].

Σχετικά με την ποσοτικοποίηση της διάρκειας ζωής μιας μπαταρίας, η πιο κατανοητή μονάδα μέτρησης είναι σε έτη (βάση των εργοστασιακών της προδιαγραφών). Ωστόσο, όπως έχει αναφερθεί, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας μπορεί να μειωθεί σημαντικά βάσει της πραγματικής χρήσης της. Επομένως, απαιτείται ένας τρόπος μέτρησης που λαμβάνει υπόψη τη χρήση της. Ένας **κύκλος** μιας μπαταρίας ορίζεται ως η διαδικασία αποφόρτισης μέχρι ένα προκαθορισμένο DoD ακολουθούμενη από την πλήρη επαναφόρτισή της. Συνεπώς, διαφορετικό DoD συνεπάγεται διαφορετικό είδος κύκλου. Υπάρχουν συναρτήσεις που προσεγγίζουν τον αριθμό κύκλων μέχρι να φτάσει η μπαταρία στο EoL. Συνεπώς, με την ποσοτικοποίηση της διάρκειας ζωής σε κύκλους παρέχεται ένας ακριβέστερος υπολογισμός.

Η συνάρτηση που δέχεται ως είσοδο ένα προκαθορισμένο DoD και επιστρέφει τον αριθμό των κύκλων μέχρι το EoL ερμηνεύεται ως εξής. Θεωρούμε ότι για όλη τη διάρκεια ζωής της

μπαταρίας, θα χρησιμοποιείται με το συγκεκριμένο είδος κύκλων, δηλαδή θα αποφορτίζεται μέχρι το προκαθορισμένο DoD και ύστερα θα φορτίζεται πλήρως. Η τελευταία συνάρτηση έχει ξεχωριστή σημασία στην μοντελοποίηση της αλλοίωσης της μπαταρίας. Μπορεί να αναφερθώ στην συγκεκριμένη με τον αγγλικό όρο SoC-Degradation curve. Αντιστρέφοντας την έξοδό της, το αποτέλεσμα είναι η **αλλοίωση ανά κύκλο**.

$$DP^{cyc} = \frac{1}{cycles}$$

Είναι φυσικό να προκύψει η απορία σχετικά με το πώς η έννοια των κύκλων συνεισφέρει στην εκτίμηση της διάρκειας ζωής μιας μπαταρίας, δεδομένου ότι η συνεχιζόμενη αποφόρτιση έως ένα προκαθορισμένο DoD και η πλήρης φόρτιση μέχρι το EoL δεν αντικατοπτρίζουν πλήρως τις πραγματικές συνθήκες χρήσης. Ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζουμε τους λεγόμενους ακανόνιστους κύκλους περιγράφεται στο 3.1.2, όπου θα παρουσιαστεί το μοντέλο αλλοίωσης της μπαταρίας. Προς το παρόν, ας εξετάσουμε πώς η έννοια των κύκλων μπορεί να βελτιώσει την εκτίμηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Ειδικότερα, εάν επιβάλλουμε το DoD να είναι μεγαλύτερο από ένα ελάχιστο όριο, μπορούμε μέσω της SoC-Degradation curve να υπολογίσουμε τον ελάχιστο αριθμό κύκλων που θα εκτελέσει η μπαταρία. Κατα συνέπεια, θα έχουμε μία εκτίμηση για την ελάχιστη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Τέλος, με την έννοια των **ακανόνιστων κύκλων** (irregular cycles) εννοούμε την χρήση της μπαταρίας με τρόπο που δεν άπτεται σε κανονικό κύκλο. Σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, οι μπαταρίες είναι βέβαιο ότι θα πρέπει να μπορούν να εκτελούν ακανόνιστους κύκλους. [8]

### 2.2.5 Κόστος

Παρά τη συνεχή βελτίωση στην τεχνολογία των μπαταριών, το κόστος εισαγωγής τους σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας παραμένει αρκετά υψηλό [5]. Ως εκ τούτου, το κόστος εισαγωγής μιας μπαταρίας καθορίζεται ως κύριο κριτήριο για τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Μία απλοϊκή προσέγγιση θα ήταν να εξετάσουμε τη δυνατότητα απόσβεσης της μπαταρίας εντός της προβλεπόμενης διάρκειας ζωής της, με βάση τις εργοστασιακές προδιαγραφές της. Ωστόσο, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη από τον βαθμό στον οποίο χρησιμοποιείται [14]. Έτσι, η διάρκεια ζωής μία μπαταρίας στην οποία γίνεται υπερβολική χρήση μπορεί να είναι αισθητά μικρότερη από τις εργοστασιακές της προδιαγραφές. Στο [8] αναφέρεται ότι μέχρι το 2025 οι μπαταρίες θα στοιχίζουν περίπου 172,000€ ανά (ΜΩη), ενώ το 2016 το κόστος κυμαινόταν από 350,000 έως 700,000.

### 2.2.6 Ασφάλεια και αξιοπιστία του συστήματος

Όταν αναφέρομαι στην ασφάλεια και αξιοπιστία του συστήματος, εννοούμε την διασφάλιση της λειτουργίας του υπό διάφορες συνθήκες και περιστάσεις [12]. Σκοπός είναι να αποφευχθούν ατυχήματα ή δυσλειτουργίες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ζημιές στο σύστημα ή σε περιβάλλοντα παράγοντες. Αυτό περιλαμβάνει την προστασία από διαφορετικούς κινδύνους, όπως η υπερθέρμανση, η υπερφόρτωση, η βραχυκύκλωση και άλλα ανεπιθύμητα γεγονότα που μπορούν να προκύψουν στο σύστημα. Επίσης, η αξιοπιστία



του συστήματος αφορά τη δυνατότητα του να λειτουργεί σταθερά και απρόσκοπτα με ελάχιστη πιθανότητα διακοπών ή βλαβών, εξασφαλίζοντας τη συνεχή διαθεσιμότητα ενέργειας στο δίκτυο ή στην εφαρμογή που χρησιμοποιεί το σύστημα.

## 2.3 Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)

Ο Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων στα οποία ορισμένες ή όλες οι μεταβλητές απόφασης πρέπει να λάβουν ακέραιες τιμές. Τα προβλήματα αυτά διατυπώνονται ως γραμμικά μαθηματικά μοντέλα, τα οποία περιλαμβάνουν μία αντικειμενική συνάρτηση (objective function) η οποία βελτιστοποιείται (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση) κάτω από ένα σύνολο γραμμικών περιορισμών που ορίζουν τις επιτρεπτές λύσεις. Ο ΜΑΛΠ είναι ένας ισχυρό εργαλείο για την επίλυση σύνθετων και πρακτικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, που εμφανίζονται σε ποικίλους τομείς όπως τα οικονομικά, η βιομηχανία και η διοίκηση.

Για να ορίσουμε ένα ΜΑΛΠ χρειάζεται αρχικά να ορίσουμε την αντικειμενική συνάρτηση και τον σκοπό της βελτιστοποίησης, δηλαδή αν πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης. Ακόμη, χρειάζεται να οριστούν οι μεταβλητές και να εκφραστούν οι σχέσεις μεταξύ τους με (αν)ισότητες. Τέλος, χρειάζεται να αποσαφηνίσουμε ποιες από τις μεταβλητές είναι πραγματικές και ποιες ακέραιες. Παρακάτω παρατίθεται η γενική μορφή ενός ΜΑΛΠ μεγιστοποίησης.

$$\begin{aligned} \text{Maximize} \quad & \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{subject to} \quad & \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}, \\ & \mathbf{x} \geq \mathbf{0}, \\ & x_i \in \mathbb{Z} \text{ for some } i \in \{1, 2, \dots, n\}. \end{aligned}$$

όπου :

- $\mathbf{c}$  είναι το διάνυσμα των συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης,
- $\mathbf{x}$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης,
- $\mathbf{A}$  είναι ο πίνακας των συντελεστών των περιορισμών,
- $\mathbf{b}$  είναι το διάνυσμα των δεξιών μελών των περιορισμών,
- $x_i \in \mathbb{Z}$  σημαίνει ότι κάποιες από τις μεταβλητές είναι ακέραιες.

## 2.4 Special Ordered Sets (SOSs)

Τα Special Order Sets (SOS) είναι μαθηματικά σύνολα που χρησιμοποιούνται στον τομέα της βελτιστοποίησης, ειδικά σε προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού. Τα SOS είναι

χρήσιμα όταν οι μεταβλητές ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πρέπει να λάβουν συγκεκριμένες τιμές ή να ακολουθήσουν συγκεκριμένες σχέσεις μεταξύ τους. Στην [15] αναλύονται οι διαφορετικές εφαρμογές των SOSs.

Τα Special Order Sets Type 2 (SOS2) είναι ένας εξειδικευμένος τύπος SOS που χρησιμοποιείται κυρίως για τη μοντελοποίηση μη γραμμικών συναρτήσεων. Ένα SOS2 αποτελείται από μεταβλητές που πρέπει να είναι μη μηδενικές και να λαμβάνουν διαδοχικές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι, αν υπάρχει μια μη μηδενική τιμή σε μια μεταβλητή του SOS2, τότε μόνο οι γειτονικές μεταβλητές μπορούν επίσης να έχουν μη μηδενικές τιμές. Αυτή η ιδιαιτερότητα καθιστά τα SOS2 ιδανικά για τη μοντελοποίηση κατά διαστήματα γραμμικών συναρτήσεων, όπως στις περιπτώσεις όπου οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν διαδοχικά σημεία μιας συνάρτησης. Τα SOS2 χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές όπως η προσέγγιση μη γραμμικών καμπυλών, η μοντελοποίηση παραγωγικών διαδικασιών με κλιμακωτά κόστη και στη βιομηχανία ενέργειας για τη μοντελοποίηση καμπυλών απόδοσης.

### 2.4.1 Διαφορά μεταξύ εσόδων και κέρδους

Οι έννοιες των εσόδων και των κερδών είναι σημαντικές για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας μιας επένδυσης. Τα έσοδα αναφέρονται στα χρήματα που εισπράττονται από μια επένδυση και προκύπτουν από τις πωλήσεις ή τις υπηρεσίες που παρέχει το επενδυτικό αντικείμενο. Από την άλλη, τα κέρδη αναφέρονται στο υπόλοιπο των εσόδων μετά την αφαίρεση των λειτουργικών και κεφαλαιακών εξόδων. Για να αξιολογήσουμε τη βιωσιμότητα μιας επένδυσης, πρέπει να εξετάσουμε τα κέρδη και τα έσοδα με βάση τη σχέση τους με το κόστος της επένδυσης. Τα υψηλά έσοδα μπορεί να είναι ενθαρρυντικά, αλλά εάν τα κέρδη είναι χαμηλά ή ακόμα και αρνητικά η επένδυση μπορεί να μην είναι βιώσιμη μακροπρόθεσμα. Επομένως, η ανάλυση των κερδών και των εσόδων είναι ζωτικής σημασίας για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Ας δούμε λοιπόν πως υπολογίζονται οι παραπάνω έννοιες στο πρόβλημά μας. Όταν το πάρκο λειτουργεί χωρίς μπαταρίες, τα έσοδα προκύπτουν μέσω του παρακάτω τύπου:

$$\sum_{t=1}^T Pr_t \cdot E_t^T$$

- $Pr_t$  συμβολίζει την ωριαία τιμή ενέργειας βάση το DAM.
- $E_t^T$  συμβολίζει την ενέργεια που διατίθεται στο δίκτυο.
- $T$  συμβολίζει την τελευταία χρονική στιγμή. Για  $T = 24$ , δεδομένου ότι τα δεδομένα μας είναι ωριαία, έχουμε διάστημα μίας ημέρας.

Συνεπώς, τα έσοδα του πάρκου προκύπτουν ως άθροισμα των εσόδων ανά ώρα. Τα έσοδα ενός έτους, προκύπτουν για  $T = 24 \cdot 365 = 8760$  ώρες.

Το κέρδος στην παραπάνω περίπτωση ταυτίζεται με τα έσοδα. Αν εντάξουμε τις μπαταρίες, ο παραπάνω τύπος τροποποιείται ελαφρώς για να συμπεριλάβει την συνεισφορά της μπαταρίας σε κάθε ώρα. Έτσι, έχουμε

$$\sum_{t=1}^T \text{Pr}_t \cdot (E_t^T + E_t^B)$$

Το μόνο που αλλάζει ως προς τον υπολογισμό των εσόδων σε βάθος  $T$  είναι ότι η ενέργεια που προσφέρεται στο δίκτυο προκύπτει ως άθροισμα της παραγωγής με το ποσό που προσφέρεται από την μπαταρία ( $E_t^B$ ).

Για να υπολογιστούν τα κέρδη χρειάζονται δύο βήματα. Αρχικά, υπολογίζουμε το πλεόνασμα, εφόσον υπάρχει, στα έσοδα με την χρήση μπαταριών. Για να αναφερθούμε τελικά σε κέρδος πρέπει τα έσοδα να υπερβούν το αρχικό κεφάλαιο της μπαταρίας. Εδώ χρειάζεται να έχουμε μία εκτίμηση για την διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Τελικά, διαιρώντας το αρχικό κόστος της μπαταρίας με το προσδόκιμο ζωής της υπολογίσουμε το ύψος του πλεονάσματος που πρέπει να έχουμε κάθε χρόνο ώστε να αποσβέσουμε την επένδυση.

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάσαμε ένα μοντέλο απόσβεσης, μάλλον το προφανές. Υπάρχουν και άλλα μοντέλα απόσβεσης μίας επένδυσης αλλά δεν θα μας απασχολήσουν στην εργασία μας. [5]

## 2.4.2 Πιθανά συμπεράσματα

Έχοντας υλοποιήσει τον αλγόριθμο, μπορούμε να αξιολογήσουμε τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω της σύγκρισης του αρχικού κόστους της μπαταρίας με τα επιπλέον έσοδα που αποφέρει στο πάρκο. Ειδικότερα, χρειάζεται να γνωρίζουμε ή να υποθέσουμε το προσδόκιμο ζωής της (σε χρόνια) και να εξετάσουμε εάν επιτυγχάνεται η κάλυψη του αρχικού της κόστους εντός αυτών των χρόνων. Περισσότερες λεπτομέρειες για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας θα δώσουμε στο 4.3.2.

## 2.5 Σχετική Βιβλιογραφία

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζουμε μερικές εργασίες σχετικές με την μελέτη μας. Στόχος είναι να κατανοηθεί το υπάρχον επιστημονικό υπόβαθρο, να εντοπιστούν κενά στη γνώση και να τεκμηριωθεί η αναγκαιότητα και η συνεισφορά της τρέχουσας μελέτης.

Το πρόβλημά του προγραμματισμού και της αλλοίωσης της μπαταρίας για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας έχει μελετηθεί εκτενώς στην βιβλιογραφία [16], [17]. Στην [18] αναπτύσσεται ένα αναλυτικό φυσικό μοντέλο αλλοίωσης για την λειτουργία μικροδικτύων με χρήση του Δυναμικού Προγραμματισμού Dynamic Programming. Στην [19] αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης και κατανομής χωρητικότητας των BESS, λαμβάνοντας υπόψη την τοπολογία του δικτύου και τις περιορισμένες συνδεσιμότητες. Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων, χρησιμοποιεί γενετικό αλγόριθμο (GA) με ενσωματωμένο διαδοχικό Monte Carlo, καθώς και βελτιστοποίηση δύο σταδίων που χωρίζει την τοποθέτηση και την κατανομή χωρητικότητας σε διακριτά βήματα. Στις [1], [8], [14] γίνεται χρήση του MILP. Στην [1] αναπτύσσεται ένα πολυπαραγοντικό μοντέλο που επιτυγχάνει τον προγραμματισμό της μπαταρίας, κάνοντας πρόβλεψη της παραγωγής. Στην [8], το μοντέλο επιτυγχάνει τον βέλτιστο προγραμματισμό της μπαταρίας, περιλαμβάνοντας την αλλοίωση της βάσει του DoD και

επιτρέπει πρόβλεψη της παραγωγής αντί για δεδομένα. Η [14] επιπρόσθετα κάνει ελαχιστοποίηση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) κατά την λειτουργία του πάρκου. Σκοπός της είναι να βρει τον τρόπο που μπορούν να αλληλεπιδράσουν η μεγιστοποίηση των εσόδων, η ελαχιστοποίηση του κόστους και των εκπομπών CO<sub>2</sub>, βρίσκοντας τα Pareto-Optimal Solutions. Ακόμη, ως προς την μοντελοποίηση του Degradation, η [20] κατασκευάζει ένα ηλεκτροθερμικό μοντέλο βασισμένο στην αντίσταση (impedance based electric-thermal model). Η [21] βασίζεται σε πολυπαραγοντική ανάλυση και καταγράφει τα χαρακτηριστικά γήρανσης από δοκιμές επιτάχυνσης γήρανσης (cell acceleration) των κυψελών. Στην [22] αναπτύσσεται μία καινοτόμα μέθοδος, η οποία εστιάζει στο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε MILP. Η προτεινόμενη προσέγγιση είναι διαφορίσιμη και απαλλαγμένη από ακέραιες μεταβλητές, καθιστώντας την κατάλληλη για λύτες που βασίζονται gradient-based solvers. Επιπλέον, ως προς την μέθοδο με την οποία επιτυγχάνεται το piecewise linearization, η [23] κάνει big-M linearization.

Πέρα από το ζήτημα του προγραμματισμού και της αλλοίωσης της μπαταρίας, υπάρχουν διάφορα ακόμα ζητήματα στην προσπάθεια εισαγωγής μπαταριών, όπως η κατάλληλη διαστασιολόγηση και η τοποθέτηση της μπαταρίας [5]. Ακόμη, σε ένα πιο σύγχρονο και ευρύ πλαίσιο, στην [12] παρουσιάζονται μέθοδοι μοντελοποίησης των αβεβαιοτήτων (Uncertainty modeling approaches). Με τον όρο αβεβαιότητες, εννοείται η παραγωγή του πάρκου, η μοντελοποίηση της αλλοίωσης και ο προγραμματισμός της μπαταρίας που έχουμε αναφερθεί μέχρι τώρα. Προστίθενται οι πιθανές διακυμάνσεις του φορτίου και διαταραχές. Η καταλληλότητά της κάθε μεθόδου βασίζεται σύστημα μοντελοποίησης (system model) και στο είδος των εισαγόμενων δεδομένων.

## Κεφάλαιο 3

# Σχεδιασμός μοντέλου και υλοποίηση

Σε αυτό το κεφάλαιο εξηγούμε αναλυτικά τις μεθόδους που χρησιμοποιούμε για τον προγραμματισμό και την αλλοίωση της μπαταρίας (μοντελοποίηση) και μετά περνάμε στην υλοποίηση των μεθόδων. Όσον αφορά την μοντελοποίηση, παρουσιάζουμε την μέθοδο και μετά την κατασκευή του ΜΑΛΠ.

### 3.1 Μαθηματικός Φορμαλισμός MILP

Πριν ξεκινήσουμε την κατασκευή των (αν)ισοτήτων, να τονίσουμε ότι για τον υπολογιστή τίποτα δεν είναι δεδομένο και ότι θα πρέπει να κατασκευάσουμε με μεγάλη συνέπεια και συστηματικότητα όλους τους περιορισμούς του προβλήματος. Με τον όρο συνέπεια εννοούμε την ανάγκη να λάβουμε υπόψη όλες τις πιθανές πτυχές ή περιστάσεις που μπορεί να προκύψουν και να είμαστε βέβαιοι ότι τις καλύπτουμε με την μοντελοποίησή μας. Ακόμη, με την συστηματικότητα εννοούμε ότι όλες οι μεταβλητές και οι παράμετροι πρέπει να μετριοούνται στις ίδιες μονάδες μέτρησης.

Για λόγους σχετικούς με την υλοποίηση του ΜΑΛΠ, να διευκρινίσουμε ότι επιθυμούμε στο αριστερό μέρος της κάθε σχέσης (ανισότητα ή ισότητα) να βρίσκονται μεταβλητές απόφασης, ενδεχομένως με κάποιον συντελεστή, ενώ στα δεξιά, οι παράμετροι του προβλήματος ή σταθερές. Ακόμη, οι επιτρεπτές σχέσεις είναι η αριστερή ανισότητα ( $\leq$ ) και η ισότητα (=) λόγω της βιβλιοθήκης που χρησιμοποιούμε για την επίλυση του ΜΑΛΠ.

#### 3.1.1 Προγραμματισμός της μπαταρίας

##### Variables

$E_t^T$	Energy flow from turbine to grid at time interval t (MWh)
$E_t^{TB}$	Energy flow from turbine to battery at time interval t (MWh)
$E_t^B$	Energy flow from battery to grid at time interval t (MWh)
$B_t$	Battery energy content at the beginning of time interval t (MWh)
$\phi_t$	1 if charging, 0 otherwise at time interval t (unitless)
$\sigma_t$	1 if discharging, 0 otherwise at time interval t (unitless)

## Parameters

$Pr_t$	Price at time interval t (€/MWh)
$PW_t$	Energy produced from the turbine(s) at time interval t (MWh)
$PW_{max}$	Maximum energy production in an hour (MWh)
$Con_t$	Hourly constraint factor at time interval t (unitless)
$B_{dis}$	Battery max discharge (MWh)
$B_{char}$	Battery max charge (MWh)
$B_{start}$	The initial content of the battery (MWh)
$B_{max}$	Battery maximum energy content (MWh)
$B_{min}$	Battery minimum energy content (MWh)

### Notes:

- 1) Having  $\phi_t$  equal to 0 does not imply that the battery is being discharged; it simply means that the battery is not being charged.
- 2)  $PW_t$  refers to the energy produced from t-1 till t. For example, assuming timestamp is an hour and the starting hour is 1, the energy produced by the turbine from 11-12 will be stored in  $PW_{12}$ .

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση των εσόδων. Τα συνολικά έσοδα μεγιστοποιούνται όταν κατανεμηθεί η παραγωγή του πάρκου ώστε να πουληθεί στην υψηλότερη δυνατή τιμή, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς. Τα έσοδα κάθε ώρας υπολογίζονται ως γινόμενο της ωριαίας τιμής (έχουν εξαρχής περιοριστεί βάση του ceiling) με την προσφερόμενη ενέργεια. Η προσφερόμενη ενέργεια είναι το άθροισμα της ενέργειας που προσφέρεται από την γεννήτρια και την μπαταρία. Τέλος, τα έσοδά σε βάθος ενός χρονικού ορίζοντα που εκτελείται ο αλγόριθμος (τυπικά μία μέρα) προκύπτουν σαν άθροισμα των εσόδων κάθε ώρας.

Συνεχίζουμε δίνοντας την ερμηνεία της κάθε σχέσης που εμφανίζεται στο ΜΑΛΠ μοντέλο υπεύθυνο για τον προγραμματισμό. Ο αριθμός στην αρχή της κάθε παραγράφου προσδιορίζει την σχέση στην οποία αναφερόμαστε.

1) Η ενέργεια που παράγεται από τη γεννήτρια διανέμεται σε δύο μέρη. Ένα ποσό αυτής θα διατεθεί άμεσα στο δίκτυο, ενώ το υπόλοιπο θα χρησιμοποιηθεί για τη φόρτιση της μπαταρίας. Ως εκ τούτου, η συνολική παραγωγή ενέργειας από τη γεννήτρια δεν μπορεί να υπερβαίνει την ωριαία παραγωγή της ανεμογεννήτριας.

2) Η ενέργεια που ενσωματώνεται στο δίκτυο εντός μιας ώρας πρέπει να παραμένει εντός ενός καθορισμένου ποσοστού της εγκατεστημένης ισχύος (Περικοπές Έγχυσης). Αυτή η ενέργεια προκύπτει από το σύνολο της ενέργειας που παρέχεται άμεσα στο δίκτυο από τη γεννήτρια και την ενέργεια που απελευθερώνεται από τη μπαταρία. Στο 2.1.2 εξηγήσαμε τις ωριαίες περικοπές έγχυσης ανά χρονική περίοδο και είδος πάρκου. Η παράμετρος  $Con_t$  περιέχει το ποσοστό της περικοπής την δεδομένη ώρα. Τελικά, το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσό

ενσωμάτωσης στο δίκτυο προκύπτει από το γινόμενο

$$EFC_t = \text{Con}_t \cdot PW_{\max}$$

3-4) Στο 2.2.3 μιλήσαμε και για τα ratings μίας μπαταρίας. Οι επόμενες ανισότητες εκφράζουν το μέγιστο ποσό ενέργειας που μπορεί να φορτιστεί ή να αποφορτιστεί από την μπαταρία εντός μία ώρας. Εκφράζονται σε MWh και όχι σε ποσοστό επί της μέγιστης χωρητικότητας.

5-7) Στον αλγόριθμο δεν επιτρέπεται η ταυτόχρονη φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας. Για να ενσωματώσουμε αυτήν τη συνθήκη, απαγορεύουμε στις δύο μεταβλητές  $E^{TB}$  (ποσό φόρτισης) και  $E^B$  (ποσό αποφόρτισης) να είναι ταυτόχρονα θετικές. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση τριών ανισοτήτων και δύο δυαδικών μεταβλητών, που λαμβάνουν τιμές 0 ή 1, γνωστές ως flags στον προγραμματισμό.

Ορίζουμε λοιπόν τις δυαδικές μεταβλητές,  $\phi$  (φόρτιση) και  $\sigma$  (αποφόρτιση), οι οποίες εκφράζουν την ενέργεια που εκτελείται στην μπαταρία για την διάρκεια της ώρας  $t$ . Μια μεταβλητή με τιμή 1 υποδεικνύει ενεργοποίηση της φόρτισης ή αποφόρτισης, ενώ τιμή 0 υποδεικνύει απενεργοποίηση. Δεν επιτρέπεται  $\phi = \sigma = 1$ , αλλά επιτρέπεται  $\phi = \sigma = 0$ , δηλαδή να μην γίνεται χρήση της μπαταρίας. Να παρατηρήσουμε ότι  $\phi = 0$  δεν συνεπάγεται ότι  $\sigma = 1$ . Με άλλα λόγια, η ένδειξη για μη φόρτιση δεν συνεπάγεται την αποφόρτιση!

Υπάρχουν πολλά σενάρια κάτω από τα οποία ο αλγόριθμος θα αποφάσιζε να μην κάνει χρήση της μπαταρίας. Για παράδειγμα, ένα προφανές σενάριο είναι όταν η παραγόμενη ενέργεια είναι υπερβαίνει τα αποδεκτά όρια (έχουμε περίσσεια παραγόμενης ενέργειας από το πάρκο) και η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη.

Τέλος, πρώτου δώσουμε το πακέτο ανισώσεων που επιτυγχάνει τα παραπάνω, ας δούμε αναλυτικά την περίπτωση που πρόκειται να φορτίσουμε την μπαταρία. Θα είναι  $\phi = 1$  (φόρτιση), οπότε  $\sigma = 0$  (ανίσωση 5 σε συνδυασμό με το γεγονός ότι είναι δυαδικές) δηλαδή  $E^{TB} \leq B_{\max}$  και  $E^B \leq 0$ . Άρα μπορεί να προσφερθεί μέχρι  $B_{\max}$  για αποθήκευση ενώ δεν μπορεί να αντληθεί ενέργεια από την μπαταρία ( $E^B = 0$ ).

8) Βεβαιωνόμαστε ότι ο αλγόριθμος δεν θα προσπαθήσει να αντλήσει παραπάνω ποσό από την μπαταρία από αυτό που περιέχει. Η ανισότητα 8 ίσως είναι περιττή δεδομένων των υπολοίπων.

9) Με αυτή την εξίσωση παρακολουθούμε το SoC της μπαταρίας κατά την διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Το SoC της μπαταρίας σε μία ώρα μέσα στην ημέρα προκύπτει αναδρομικά με βάση τις επιλογές που λήφθηκαν στις προηγούμενες ώρες. Για παράδειγμα το  $B_2 = B_{\text{start}} - E_1^B + E_1^{TB}$  εκφράζει το απόθεμα της μπαταρίας την στην αρχή της δεύτερης ώρας ως την διαφορά από την αρχική κατάσταση της μπαταρίας (πχ στην αρχή της ημέρας) αφαιρώντας το ποσό που αντλήθηκε την πρώτη ώρα προσθέτοντας το ποσό που απορρόφησε. Όμοια, για οποιαδήποτε ώρα μέσα στην ημέρα. Όλες οι ποσότητες που εμφανίζονται στην συγκεκριμένη εξίσωση μετριοούνται σε MWh και όχι σε ποσοστά.

Στην παρούσα διπλωματική έχουμε θεωρήσει ότι δεν υπάρχουν απώλειες κατά την λει-

τουργία τις μπαταρίας,  $\eta = 1$  (roundtrip efficiency). Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι για τους οποίους κάναμε την συγκεκριμένη παραδοχή. Αφενός δεν εμβαθύνουμε στην επιλογή συγκεκριμένης μπαταρίας και η συγκεκριμένη παράμετρος είναι αποκλειστικά εξαρτώμενη από την μπαταρία, αφετέρου διευκολύνονται αρκετοί από τους ελέγχους εγκυρότητας του μοντέλου.

10) Με τις παρούσες ανισότητες, περιορίζουμε τη μέγιστη και ελάχιστη στάθμη της μπαταρίας σε επίπεδα μικρότερα από τις εργοστασιακές ρυθμίσεις. Τα όρια αυτά παρέχονται ως παράμετροι και είναι στη διακριτική ευχέρεια του χρήστη. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η διατήρηση της στάθμης της μπαταρίας εντός κατάλληλα καθορισμένων ορίων μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη μακροζωία της, χωρίς να θυσιάζεται η αποδοτικότητά της [13].

11, 12) Στην παρούσα μοντελοποίηση, το  $B_t$  αντιπροσωπεύει το περιεχόμενο της μπαταρίας στην αρχή της χρονικής στιγμής  $t$ . Ένα τεχνικό πρόβλημα ανακύπτει στον αλγόριθμο, το οποίο καλύπτεται με τις επόμενες δύο ανισότητες. Παρατηρήθηκε ότι την τελευταία ώρα λειτουργίας του αλγόριθμου, η μεταβλητή  $E_{last}^B$  (τελευταία αποφόρτιση) μπορούσε να λάβει τιμές μεγαλύτερες από το περιεχόμενο της μπαταρίας. Τεχνικά, αυτό συμβαίνει διότι θα χρειαζόταν ένα  $B_{(last+1)}$  για να επιβάλλονται οι απαραίτητοι περιορισμοί στο  $E^B$ . Οι ανισότητες που ακολουθούν αποτρέπουν αυτό το φαινόμενο.

Παρατηρήσεις:

1) Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί η σημασία κάθε μεταβλητής απόφασης στη χρονική στιγμή  $t$ . Για παράδειγμα, εάν το μοντέλο προτείνει την πρώτη ώρα ( $t = 1$ ) η  $E_1^B = 10$ , αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια μίας ώρας η μπαταρία αποφορτίζεται κατά 10 MWh. Η αποφόρτιση δεν γίνεται στιγμιαία ούτε στην αρχή ούτε στο τέλος της ώρας, αλλά μεταφέρεται στη διάρκειά της. Έτσι, θεωρούμε ότι η μέση ισχύς της μπαταρίας είναι 10 MW για μία ώρα, αποδίδοντας 10 MWh. Παρόμοια ερμηνεία ισχύει και για τις υπόλοιπες κρίσιμες μεταβλητές απόφασης, όπως οι  $E^T$  και  $E^{TB}$ . Αντίθετα, η  $B_t$  αναφέρεται στο περιεχόμενο της μπαταρίας στην αρχή της ώρας, όπως ορίζεται και στο Nomenclature.



Objective

$$\max \sum_{t=1}^T Pr_t * (E_t^T + E_t^B)$$

Constraints

$$E_t^T + E_t^{TB} \leq PW_t \quad (3.1)$$

$$E_t^T + E_t^B \leq PW_{max} * Con_t \quad (3.2)$$

$$E_t^B \leq B_{dis} \quad (3.3)$$

$$E_t^{TB} \leq B_{char} \quad (3.4)$$

$$\phi_t + \sigma_t \leq 1 \quad (3.5)$$

$$E_t^{TB} - B_{max} * \phi_t \leq 0 \quad (3.6)$$

$$E_t^B - B_{max} * \sigma_t \leq 0 \quad (3.7)$$

$$E_t^B - B_t \leq 0 \quad (3.8)$$

$$B_t - \sum_{\tau=1}^{t-1} (E_{\tau}^{TB} - E_{\tau}^B) = B_{start} \quad (3.9)$$

$$B_{min} \leq B_t \leq B_{max} \quad (3.10)$$

$$E_{last}^B - B_{last} \leq -B_{min} \quad (3.11)$$

$$B_{last} + E_{last}^{TB} \leq B_{max} \quad (3.12)$$

### 3.1.2 Αλλοίωση της μπαταρίας

#### Variables

$DP_t$	Degradation at time interval t (unitless)
$DP_t^{tot}$	Total Degradation till time t (unitless)
$deg_t^{cy}$	Degradation caused from cycling at time interval t (unitless)
$deg_t$	approximate degradation value of SoC-Degradation curve at time interval t (unitless)
$D_{t,m}, d_{t,m}$	SOSs of SoC-Degradation curve of piecewise linearization at time interval t.(unitless)

#### Parameters

$cost$	Battery's capital cost (€)
$L_{hour}^{shelf}$	Battery's shelf degradation per hour (unitless)
$SoC_m$	Key points of SoC at SoC-Degradation curve (unitless)
$deg_m$	key points of deg at SoC-Degradation curve (unitless)
$B_t$	Battery energy content at the beginning of time interval t (%)

**Notes:**

- 1) For the degradation MILP we consider SoC at time  $t$  as a parameter. Given the SoC at time interval  $t$  we can find the variable  $deg_t$
- 2)  $DP_t^{tot}$  does not affect the Degradation MILP. It is used for finding the yearly degradation.
- 3)  $m$  is the index of piecewise segment of battery SoC.

Στο Κεφάλαιο 2 εξηγήσαμε τι είναι η αλλοίωση της μπαταρίας και το πως μπορούμε να την μετρήσουμε με το DP. Μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν την αλλοίωση της μπαταρίας και άρα το DP, στην παρούσα μοντελοποίηση, εστιάζουμε στο DoD, βασισμένοι στην μοντελοποίηση που γίνεται στο [8]. Στην επόμενη παράγραφο, απαντάμε κυρίως στα επόμενα δύο ερωτήματα:

- Πως αντιλαμβάνεται το μοντέλο την αλλοίωση της μπαταρίας;
- Πως διαχειριζόμαστε το γεγονός ότι η χρήση της μπαταρίας αποτελείται κυρίως ακανόνιστους κύκλους;

Η αλλοίωση της μπαταρίας μπορεί να διαχωριστεί σε ημερολογιακή φθορά και φθορά λόγω κύκλων (λόγω χρήσης). Η ημερολογιακή φθορά (shelf degradation) αντιστοιχεί στη φυσιολογική διαδικασία διάβρωσης, η οποία είναι ανεξάρτητη από τη λειτουργία της μπαταρίας και θεωρείται σταθερή. Η αλλοίωση λόγω κύκλων (cycling degradation) αντιστοιχεί στη φθορά κατά τη χρήση και εξαρτάται από το DoD. Ωστόσο, ισχύει η επόμενη σχέση

$$DoD = 1 - SoC$$

και άρα για τον υπολογισμό του DoD εστιάζουμε στην μεταβλητή απόφασης  $B_t$ , η οποία εκφράζει το SoC. Σε κάθε χρονικό διάστημα μίας ώρας, η αλλοίωση της μπαταρίας,  $DP_t$  προκύπτει να είναι η μέγιστη από τις δύο ποσότητες. Παρακάτω εξηγούμε αναλυτικά πως υπολογίζονται οι δύο διαφορετικές φθορές της μπαταρίας. Προς το παρόν, ας εξετάσουμε πώς χρησιμοποιούμε το  $DP_t$  για να αντιληφθεί το μοντέλο την αλλοίωση λόγω χρήσης. Εισάγουμε στην αντικειμενική συνάρτηση την ποσότητα  $cost \cdot DP_t$ , όπου το  $cost$  αναφέρεται στο κόστος αγοράς της μπαταρίας. Έτσι, κάθε φορά που το μοντέλο κάνει χρήση της μπαταρίας, το DP αυξάνεται ανάλογα με το μέγεθος της καταπόνησης, και κατά συνέπεια αυξάνεται και το κόστος χρήσης.

Για τον υπολογισμό της ημερολογιακής φθοράς, αρκεί να υποθέσουμε τα χρόνια που θα ζήσει ανεξάρτητα του αν χρησιμοποιείται ( $L^{shelf}$ ). Πρόκειται, δηλαδή, για ένα άνω φράγμα στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η αντίστροφη ποσότητα από το  $L^{shelf}$ , όταν μετατραπεί σε ώρες, δίνει την αλλοίωση λόγω ημερολογιακής φθοράς ανά ώρα.

$$L_{hour}^{shelf} = \frac{1}{L^{shelf}}$$

Για παράδειγμα, η ημερολογιακή φθορά δεδομένου ότι το  $L^{shelf}$  είναι 30 χρόνια, οπότε ανά ώρα  $L_{hour}^{shelf} = 30 \cdot 365 \cdot 24 = 2,631,600$  είναι  $\frac{1}{L_{hour}^{shelf}} = 3.8 \cdot 10^{-6}$

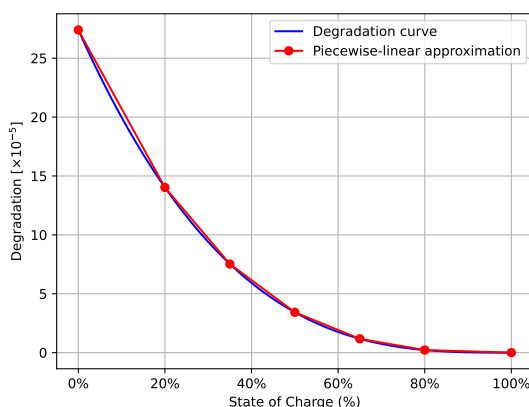
Για τον υπολογισμό της φθοράς λόγω χρήσης, τα πράγματα είναι εύκολα στην ιδανική περίπτωση όπου η χρήση της μπαταρίας γίνεται με κανονικούς κύκλους. Μέσω της συνάρτησης Deg-SoC curve μπορούμε να βρούμε την αλλοίωση ανά κύκλο. Για παράδειγμα, για  $SoC = 20\%$ ,  $Deg = \frac{1}{4770} = 0.0002$ . Για τον υπολογισμό των ακανόνιστων κύκλων, χρησιμοποιούμε την επόμενη εξίσωση για να προσεγγίσουμε την αλλοίωση λόγω χρήσης:

$$deg_t^{cy} = \frac{|deg_t - deg_{t-1}|}{2}$$

Δεδομένου του SoC της μπαταρίας την ώρα  $t-1$  ( $B_{t-1}$ ), προκύπτει μέσω της Deg-SoC curve το  $deg_{t-1}$ . Όμοια, με αφετηρία την  $B_{t-1}$ , η χρήση της μπαταρίας αποτυπώνεται ως η απόλυτη διαφορά με την  $B_t$ . Από το  $B_t$  προκύπτει το  $deg_t$ . Τέλος, η απόλυτη διαφορά των  $deg$ , πολλαπλασιασμένη με 0.5 επειδή πρόκειται για μισό κύκλο (φόρτιση ή αποφόρτιση), μας δίνει την φθορά λόγω χρήσης. Με αυτό τον τρόπο, προσεγγίζουμε την φθορά της μπαταρίας λόγω χρήσης για οποια μετατόπιση του SoC.

Υπάρχει ένα τελευταίο εμπόδιο που συναντάμε στην προσπάθεια μοντελοποίησης της αλλοίωσης της μπαταρίας με ΜΑΓΠ. Στο ενότητα 2.3 αναφερθήκαμε στην γραμμικότητα (οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών πρέπει να είναι γραμμικές) ως μία από τις υποθέσεις του ΜΑΓΠ. Ειδικότερα, η κατάσταση της μπαταρίας ( $E_t$ ) με το ποσο αλλοίωσης της μπαταρίας ( $deg_t$ ) δεν σχετίζονται με γραμμικό τρόπο. Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τον ΜΑΓΠ, κάνουμε χρήση των SOSs προσεγγίζοντας την παρακάτω καμπύλη κατά διαστήματα γραμμικά, όπως γίνεται στα [8], [14]. Στο δεύτερο δίνεται ο επόμενος τύπος της SoC-Deg curve, όπου A, B παράμετροι της συνάρτησης.:

$$Deg(SoC) = A \cdot SoC^B$$



Σχήμα 3.1: Piecewise linearization of Degradation SoC curve

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους. Όπως και στον προγραμματισμό της μπαταρίας, το κόστος σε βάθος ενός χρονικού ορίζοντα  $T$  υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους ωριαίων κοστών. Για παράδειγμα, αν εκτελέσουμε τον αλγόριθμο

για μία ημέρα ( $T = 24$ ), το συνολικό κόστος προκύπτει από το άθροισμα των κοστών κάθε ώρας. Το κόστος κάθε ώρας υπολογίζεται ως το γινόμενο της αλλοίωσης που υπέστη η μπαταρία την τελευταία ώρα πολλαπλασιασμένη με το αρχικό κόστος της μπαταρίας. Συνεπώς, το μοντέλο καταλαβαίνει ότι όσο περισσότερο κάνει χρήση της μπαταρίας, τόσο μεγαλώνει το  $DP_t$  (το ποσό που δίνει την αλλοίωση της μπαταρίας) το οποίο μεταφράζεται σε χρήματα.

1,2) Η αλλοίωση για την τελευταία ώρα προκύπτει από την μέγιστη τιμή μεταξύ των δύο φθορών.

$$DP_t = \max\{deg_t^{cy}, \frac{-1}{L_{hour}^{shelf}}\}$$

3,4) Οι ανισώσεις 3, 4 μοντελοποιούν την σχέση

$$deg_t^{cy} = \frac{|deg_t - deg_{t-1}|}{2}$$

6) Υπολογίζεται η αλλοίωσης της μπαταρίας λόγω χρήσης για όλη την χρονική περίοδο που εκτελείται το MILP. Δεν χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση άμεσα ή έμεσα για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης. Ωστόσο, η σημασία της βρίσκεται σε τεχνικά ζητήματα υλοποίησης. Συγκεκριμένα, καθιστά εύκολο τον υπολογισμό της αλλοίωσης της μπαταρίας για πολλές εκτελέσεις του MILP.

5,7,8-10) Το πακέτο αυτό ανισώσεων είναι η μοντελοποίηση της κατά διαστήματα γραμμικοποίησης της Deg-SoC curve.

Objective

$$\min \sum_{t=1}^T cost * DP_t$$

Constraints

$$deg_t^{cy} - DP_t \leq 0 \quad (3.1)$$

$$-DP_t \leq -1 / L_{hour}^{shelf} \quad (3.2)$$

$$0.5 * (deg_t - deg_{t-1}) - deg_t^{cy} \leq 0 \quad (3.3)$$

$$0.5 * (deg_{t-1} - deg_t) - deg_t^{cy} \leq 0 \quad (3.4)$$

$$\Delta_{t,m} - \delta_{t,m} - \delta_{t,m-1} \leq 0 \quad (3.5)$$

$$DP_t^{tot} - \sum_{\tau=1}^t DP_{\tau} = 0 \quad (3.6)$$

$$- \sum_{m=1}^M SoC_m * \Delta_{t,m} = -B_t \quad (3.7)$$

$$deg_t - \sum_{m=1}^M deg_m * \Delta_{t,m} = 0 \quad (3.8)$$

$$\sum_{m=1}^M \Delta_{t,m} = 1 \quad (3.9)$$

$$\sum_{m=1}^M \delta_{t,m} = 1 \quad (3.10)$$

### 3.1.3 Πλήρες μοντέλο

$$\min \sum_{t=1}^T cost * DP_t - Pr_t * (E_t^T + E_t^B)$$

$$E_t^T + E_t^{TB} \leq PW_t \quad (3.1)$$

$$E_t^T + E_t^B \leq PW_{max} * Con_t \quad (3.2)$$

$$E_t^B \leq B_{dis} \quad (3.3)$$

$$E_t^{TB} \leq B_{char} \quad (3.4)$$

$$\phi_t + \sigma_t \leq 1 \quad (3.5)$$

$$E_t^{TB} - B_{max} * \phi_t \leq 0 \quad (3.6)$$

$$E_t^B - B_{max} * \sigma_t \leq 0 \quad (3.7)$$

$$E_t^B - B_t \leq 0 \quad (3.8)$$

$$deg_t^{cy} - DP_t \leq 0 \quad (3.9)$$

$$-DP_t \leq -1 / L_{hour}^{shelf} \quad (3.10)$$

$$0.5 * (deg_t - deg_{t-1}) - deg_t^{cy} \leq 0 \quad (3.11)$$

$$0.5 * (deg_{t-1} - deg_t) - deg_t^{cy} \leq 0 \quad (3.12)$$

$$\Delta_{t,m} - \delta_{t,m} - \delta_{t,m-1} \leq 0 \quad (3.13)$$

$$B_t - \sum_{\tau=1}^{t-1} (E_{\tau}^{TB} - E_{\tau}^B) = B_{start} \quad (3.14)$$

$$DP_t^{tot} - \sum_{\tau=1}^t DP_{\tau} = 0 \quad (3.15)$$

$$B_t - \sum_{m=1}^M SoC_m * \Delta_{t,m} = 0 \quad (3.16)$$

$$deg_t - \sum_{m=1}^M deg_m * \Delta_{t,m} = 0 \quad (3.17)$$

$$\sum_{m=1}^M \Delta_{t,m} = 1 \quad (3.18)$$

$$\sum_{m=1}^M \delta_{t,m} = 1 \quad (3.19)$$

$$E_{last}^B - B_{last} \leq -B_{min} \quad (3.20)$$

$$B_{last} + E_{last}^{TB} \leq B_{max} \quad (3.21)$$

$$B_{min} \leq B_t \leq B_{max} \quad (3.22)$$

Αρκεί να εξηγήσουμε την αντικειμενική συνάρτηση. Πρόκειται για ένα ΜΑΓΠ, όπου μεγιστοποιούμε τα έσοδα, ενώ ελαχιστοποιούμε το κόστος. Για λόγους υλοποίησης, λύνουμε το συμμετρικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης (ο λόγος που βλέπουμε  $\min$  παρακάτω) και πολλαπλασιάζουμε την έξοδο της αντικειμενική με  $-1$ . Η σύνδεση των δύο μοντέλων έγκειται στην κατάσταση της μπαταρίας  $B_t$  και μόνο.

## 3.2 Υλοποίηση

Για την υλοποίηση των παραπάνω χρησιμοποιήσαμε προγραμματισμό με `python`. Κάνουμε χρήση της βιβλιοθήκης `optimize` και συγκεκριμένα της `linprog`, με `method = highs-ipm`. Η `highs-ipm` είναι ένας βελτιστοποιητής για προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, όπως και ΜΑΓΠ, που χρησιμοποιεί την μέθοδο εσωτερικών σημείων Interior Point Method. Αυτός ο αλγόριθμος είναι αποτελεσματικός για την επίλυση μεγάλων και πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης, επιτρέποντας την εύρεση βέλτιστων λύσεων με υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα. Χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτούν βέλτιστες λύσεις σε σύνθετα συστήματα με πολλές μεταβλητές και περιορισμούς.

Η υλοποίηση του αλγορίθμου για μία ημέρα δεν διαρκούσε παραπάνω από 5 δευτερόλεπτα, ενώ για έναν χρόνο (365 ΜΑΠ) διαρκούσε από 2 έως 7 λεπτά. Εδώ φαίνεται και η αποτελεσματικότητα της επίλυσης του προβλήματος με ΜΑΠ. Η χρονική πολυπλοκότητα του σύνθετου μοντέλου που κατασκευάστηκε βρίσκεται σε πολύ λογικά πλαίσια.





# Εμπειρική αξιολόγηση και συζήτηση

---

Στο παρόν κεφάλαιο, εφαρμόζουμε το κατασκευασμένο μοντέλο σε πραγματικά δεδομένα, με σκοπό την απάντηση των κεντρικών ερωτημάτων της μελέτης μας. Ειδικότερα, αφού παρουσιάσουμε τις παραμέτρους του μοντέλου καθώς και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση, παράγουμε τα αναγκαία αποτελέσματα που θα μας επιτρέψουν να εξαγάγουμε τα τελικά συμπεράσματα.

## 4.1 Παράμετροι

Πριν αρχίσουμε τα πειράματά μας, συγκεντρώνουμε όλες τις παραμέτρους του μοντέλου και τις κατηγοριοποιούμε. Αναφερόμαστε στις ενδεικτικές τους τιμές και προσδιορίζουμε εκείνες που θα παραμείνουν σταθερές για όλα μας τα πειράματα.

### 4.1.1 Διαστασιολόγηση μπαταρίας

Σχετικά με την διαστασιολόγηση της μπαταρίας δίνουμε την χωρητικότητά της αλλά και την κατάσταση της μπαταρίας στην αρχή της χρονικής περιόδου που εκτελείται ο αλγόριθμος. Εξετάζουμε τρία διαφορετικά μοντέλα μπαταρίας ως προς τη χωρητικότητά τους, με όλες να έχουν ισχύ 40 MW και διάρκεια 1, 2 και 4 ώρες αντίστοιχα. Άρα έχουμε μπαταρίες με χωρητικότητα 40, 80, 160 MWh. Στην αρχή της ημέρας, η μπαταρία περιέχει το 80% της χωρητικότητάς της. Σχετικά με την απόδοση της μπαταρίας, έχουμε θεωρήσει ότι  $\text{Current} = 1$  και ότι σαν αυστηρά όρια της κατάστασης της μπαταρίας έχουμε θέσει το 20% με το 80% της χωρητικότητάς της. Ο λόγος βασίζεται στην βιβλιογραφία καθώς έχει αποδειχθεί ότι επιτυγχάνεται η μακροζωία της μπαταρίας χωρίς να επιβαρύνεται η χωρητικότητά της.

### 4.1.2 Αλλοίωση μπαταρίας

Σχετικά με το κόστος της μπαταρίας, έχουμε εκτελέσει τα πειράματά μας για τρεις διαφορετικές τιμές ανά MWh, 200,000, 300,000, 400,000[8]. Το κόστος αγοράς λοιπόν εξαρτάται από την χωρητικότητα της μπαταρίας και προκύπτει ως γινόμενο της χωρητικότητας με το κόστος ανά MWh. Έχουμε θεωρήσει ότι δεν υπάρχουν απώλειες κατά την φόρτιση και αποφόρτιση της μπαταρίας ( $\eta = 1$ ). Ακόμη, σχετικά με την κατά διαστήματα γραμμικοποίηση της συνάρτησης αλλοίωσης ανάλογα με την κατάσταση της μπαταρίας, έχουμε προσεγγίσει την καμπύλη με 6 ευθύγραμμα τμήματα. Οι καταστάσεις της μπαταρίας είναι στο 20%, 35%,

Πίνακας 4.1: *Model Parameters*

Symbol	Description	Value
$A$	Deg-SoC curve parameters	0.000274[14]
$B$	Deg-SoC curve parameters	1.2[14]
$capacity$	Battery capacity	[40,80,160] (MWh)
$ceiling$	Upper Bound in Price	[150,200] (€)
$cost$	Battery's capital cost	[200,000, 300,000, 400,000] (€)
$PW_{max}$	Maximum energy production in an hour	40MW
$C$	Current	1
$h$	Roundtrip Efficiency	1
$B_{dis}$	Battery max discharge	$capacity \cdot C$ (MWh)
$B_{char}$	Battery max charge	$capacity \cdot C$ (MWh)
$B_{start}$	The initial content of the battery	$0.8 \cdot capacity$ (MWh)
$B_{max}$	Battery maximum energy content	$0.8 \cdot capacity$ (MWh)
$B_{min}$	Battery minimum energy content	$0.2 \cdot capacity$ (MWh)
$L^{shelf}$	Battery's shelf degradation rate per hour	30 (years)
$SoC_m$	Key points of SoC at SoC-Deg curve	[0.2, 0.35, 0.5, 0.65, 0.8]

50%, 65%, 80% και βρίσκουμε τις αντίστοιχες τιμές αλλοίωσης. Επιπρόσθετα, δίνονται και οι παράμετροι,  $\alpha$  και  $\beta$  της συνάρτησης βασισμένοι σε βιβλιογραφία. Τέλος, δίνεται σαν παράμετρος και το είδος του μοντέλου που θέλουμε να εκτελέσουμε. Έχουμε το Μοντέλο που λαμβάνει υπόψιν την αλλοίωση της μπαταρίας και εκείνο που δεν την λαμβάνει.

### 4.1.3 Παράμετροι προβλήματος

Σχετικά με τις παραμέτρους του πάρκου, η μόνη παράμετρος είναι η ισχύς του πάρκου. Για τα πειράματά μας ανέρχεται σταθερά στα 40MW καθώς έχει γίνει scale up για να μπορούμε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά μας μεταξύ τους. Δίνουμε συγκεντρωμένες τις παραμέτρους του μοντέλου.

## 4.2 Σύνολο δεδομένων

### 4.2.1 Αρχική μορφή Συνόλου Δεδομένων

Τα δεδομένα μας αφορούν δύο διαφορετικά αιολικά πάρκα και τα προμηθευτήκαμε από την εταιρεία International Wind Engineering. Πρόκειται για ένα πάρκο στην περιοχή Καπότη και ένα στην περιοχή Μέλλια στην Ελλάδα. Το πρώτο αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια με ισχύ περίπου 2.35 MW και το δεύτερο αποτελείται από 10 ανεμογεννήτριες με ισχύ περίπου 3.5 MW ανά ανεμογεννήτρια. Για το δεύτερο πάρκο λοιπόν έχουμε συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 35 MW. Επιπλέον, όσον αφορά το χρονικό ορίζοντα των δεδομένων μας, πρόκειται για ετήσιες χρονοσειρές παραγωγής για το διάστημα 01-08-2022 μέχρι 01-08-2023 όπου στον ίδιο χρόνο γνωρίζουμε τις αντίστοιχες ωριαίες τιμές αγοραπωλησίας της ενέργειας από το DAM.

Παρά το γεγονός ότι γνωρίζουμε την παραγωγή των πάρκων για τον ίδιο χρονικό ορίζοντα,

στην αρχική τους μορφή δίνονται με διαφορετικό χρονικό βήμα. Για το πάρκο στην Καπότη το χρονικό βήμα είναι ανά μία ώρα αλλά για το πάρκο στα Μέλλια το χρονικό βήμα είναι ανά 15 λεπτά. Πρώτον, Θέλουμε να τα μετατρέψουμε σε χρονικό βήμα μία ώρας για να τα συγκρίνουμε και τις τιμές του DAM. Δεύτερον, πρέπει να βρούμε έναν τρόπο να τα συγκρίνουμε μεταξύ τους καθώς αφορούν πάρκα με διαφορετική εγκατεστημένη ισχύ. Ανακύπτει λοιπόν η ανάγκη για προεπεξεργασία των δεδομένων μας.

#### 4.2.2 Προεπεξεργασία (Preprocessing)

Συνεχίζουμε λοιπόν με την προεπεξεργασία που έγινε στα σύνολα δεδομένων ώστε να φτάσουν στην μορφή που δίνονται στον αλγόριθμο. Παραθέτουμε σε bullet points τα είδη προεπεξεργασίας που πραγματοποιήθηκαν, καθώς και ο τρόπος εφαρμογής τους σε κάθε πάρκο.

- **Χρονικό βήμα μία ώρα.**

Για το σύνολο δεδομένων που αφορούν το πάρκο στην Καπότη δίνονται με χρονικό βήμα μίας ώρας. Για το σύνολο δεδομένων που αφορά το πάρκο στα Μέλλια, βρίσκουμε την μέση παραγωγή της κάθε ανεμογεννήτριας στο διάστημα μίας ώρας. Συγκεκριμένα, για κάθε ανεμογεννήτρια αθροίζουμε τις 4 τιμές παραγωγής και διαιρούμε με 4.

- **Μέση παραγωγή πάρκου.**

Και αυτή η προεπεξεργασία αφορά το σύνολο δεδομένων από το πάρκο στα Μέλλια. Έχοντας υπολογίσει στο προηγούμενο βήμα την μέση παραγωγή της κάθε ανεμογεννήτριας ανά ώρα, βρίσκουμε την μέση παραγωγή του πάρκου ανά ώρα.

- **Αύξηση κλίμακας (Scale up).**

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα δύο πάρκα αυξάνουμε την παραγωγή τους κατάλληλα ώστε να προκύπτει πάρκο με εγκατεστημένη ισχύ 40 MW.

- **Μέρες με μηδενική παραγωγή.**

Για τεχνικούς λόγους βρήκαμε τις ημέρες του χρόνου όπου φαίνεται να υπάρχει μηδενική παραγωγή όλη την ημέρα (3/365 για το Σ.Δ. Καπότη και 0/365 για το Σ.Δ. Μέλλια) και τις αντικαταστήσαμε με παραγωγή  $1 \cdot 10^{-5}$  για την κάθε ώρα.

- **Επαύξηση δεδομένων (Data Augmentation).**

Για τα δεδομένα από το πάρκο στα Μέλλια η παραγωγή του πάρκου δίνεται από ώρα 11πμ την ημέρα 01-08-2022 και μέχρι την ώρα 11πμ την ημέρα 31-07-2023. Επαυξήσαμε λοιπόν τα δεδομένα για να ταιριάζουν με τα δεδομένα από το άλλο πάρκο και τα δεδομένα από το DAM. Οι ελλείπουσες τιμές αντικαταστάθηκαν με την μέση παραγωγή του πάρκου για την ημέρα στην οποία αφορούν.

### 4.3 Αποτελέσματα

Αρχικά, μελετάμε την συμπεριφορά των δύο MILP. Σκοπός είναι να φανεί πως το μοντέλο που λαμβάνει υπόψιν την αλλοίωση της μπαταρίας, συνολικά αυξάνει τα έσοδά μας. Στην

συνέχεια, θα δώσουμε την απάντηση στο κεντρικό ερώτημα για το αν η επένδυση είναι βιώσιμη. Η ανάλυσή μας αποκαλύπτει ότι, δεδομένης της παρούσας ενεργειακής κατάστασης στην Ελλάδα και του υψηλού κόστους των μπαταριών, το πάρκο δεν μπορεί να αποσβέσει την μπαταρία. Βρίσκουμε, λοιπόν, το ύψος της επιχορήγησης που θα χρειαζόταν για να γίνει η επένδυση βιώσιμη. Τέλος, διατυπώνουμε και απαντάμε στο εξής ενδιαφέρον ερώτημα. Κατά πόσο θα μπορούσαμε να αυξήσουμε τα κέρδη μας, εάν γνωρίζαμε την παραγωγή και των επόμενων ημερών παρά με την τιμή του DAM; Για να απαντήσουμε σε αυτό το ερώτημα εισάγουμε την έννοια του competitive ratio.

### 4.3.1 Σύγκριση Μοντέλων

Σε αυτή την ενότητα συγκρίνουμε τα δύο μοντέλα. Αυτό που θέλουμε να αποτυπώσουμε είναι ότι το μοντέλο που λαμβάνει υπόψιν την αλλοίωση της μπαταρίας επιτυγχάνει συνολικά περισσότερα έσοδα. Λέγοντας συνολικά εννοούμε τα πραγματικά έσοδα που προκύπτουν διαφορετικά για το κάθε μοντέλο. Για το απλο μοντέλο, πρέπει να αφαιρέσουμε το κόστος χρήσης. Η επόμενη εξίσωση θα βοηθήσει,

$$actual\_revenue = scheduling\_revenue - (capital\_cost) * DP_{\Delta t}$$

Αντίθετα για το σύνθετο μοντέλο, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ταυτίζεται με τα πραγματικά έσοδα.

### Ημερήσια σύγκριση

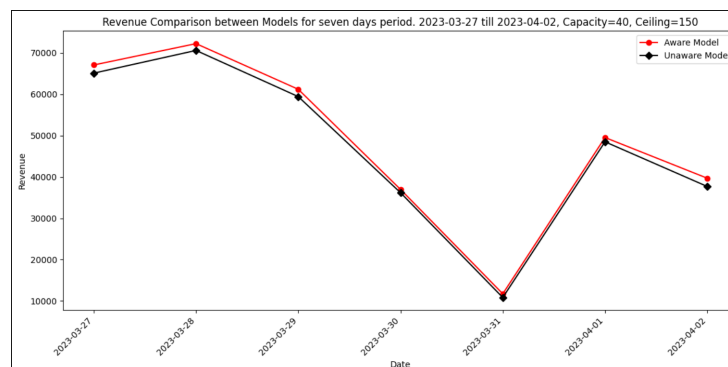
Προχωράμε, λοιπόν, στην εξαγωγή των επόμενων διαγράμματα τα οποία αποτυπώνουν το ύψος των εσόδων που επιτυγχάνουν τα δύο μοντέλα για διάστημα 7 συνεχόμενων ημερών. Το ένα διάγραμμα αποτυπώνει τα πραγματικά έσοδα ενώ το άλλο αποτυπώνει την αλλοίωση της μπαταρίας ανά ημέρα. Ο πίνακας που βρίσκεται πάνω από τα δύο διαγράμματα αποτυπώνει την συνολική αύξηση των εσόδων σε χρήματα και σε ποσοστό. Οι επόμενες εξισώσεις δείχνουν πως προκύπτουν οι τιμές του πίνακα. Το συγκεκριμένο πείραμα εκτελέστηκε για μπαταρία με χωρητικότητα 40 MWh και ceiling = 150.

$$revenue\_incrament(€) = Deg\_aware\_revenue - Deg\_unaware\_revenue$$

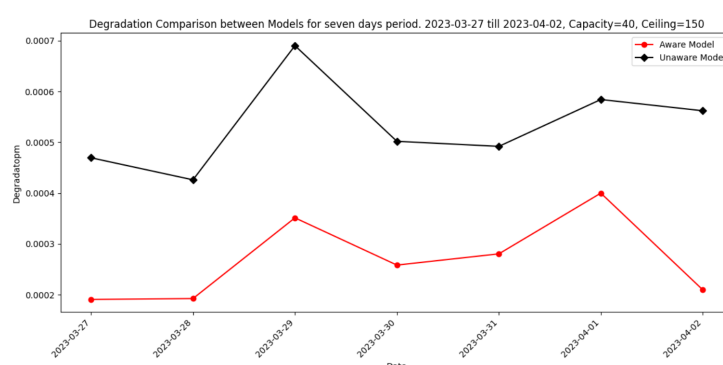
$$revenue\_incrament(%) = \frac{Deg\_aware\_revenue}{Deg\_unaware\_revenue} - 1$$

Πίνακας 4.2: Models Comparison for 7 days

Revenue \ Day	2023-03-27	28	29	30	31	04-01	02
<b>Rev Inc (€)</b>	1997	1647	1770	792	898	1036	2000
<b>Rev Inc (%)</b>	3.04%	2.33%	2.98%	2.19%	8.30%	2.14%	5.31%



Σχήμα 4.1: Revenue Comparison, Kap, capacity=40, ceiling=150



Σχήμα 4.2: Degradation Comparison, Kap, capacity=40, ceiling=150

Παρατηρώντας το γράφημα των εσόδων ανά ημέρα, διαπιστώνεται ότι το μοντέλο που λαμβάνει υπόψη την αλλοίωση της μπαταρίας επιτυγχάνει καθημερινά υψηλότερα έσοδα, όπως αναμενόταν. Ωστόσο, η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων φαίνεται να είναι εξαιρετικά μικρή. Για τον λόγο αυτό, κατασκευάσαμε τον πίνακα σύγκρισης. Είναι πιο σημαντικό να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με βάση τα ποσοστά αύξησης, καθώς υψηλότερα έσοδα δεν συνεπάγονται απαραίτητα μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης για την συγκεκριμένη ημέρα. Για τις συγκεκριμένες ημερομηνίες, το σύνθετο μοντέλο επιτυγχάνει αύξηση στα ημερήσια έσοδα από 2,19% έως 8,30%.

Από την άλλη, το γράφημα της αλλοίωσης της μπαταρίας δείχνει ότι το μοντέλο που δεν λαμβάνει υπόψη την αλλοίωση παρουσιάζει υψηλότερες τιμές καθημερινά. Εδώ φαίνεται και ο λόγος που το σύνθετο μοντέλο επιτυγχάνει περισσότερα έσοδα συνολικά, συγκριτικά με το απλό. Ο βαθμός στον οποίο αλλοιώνει την μπαταρία ξεπερνάει τα επιπλέον έσοδα που προσφέρει.

### Ετήσια σύγκριση

Συνεχίζουμε με την σύγκριση των μοντέλων για διάστημα ενός χρόνου. Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, θέλουμε να επιβεβαιώσουμε ότι το σύνθετο μοντέλο συνολικά αυξάνει τα έσοδα. Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται τα ετήσια έσοδα παραμένει ο ίδιος. Παραθέτουμε, λοιπόν, τους πίνακες για τιμές του ceiling 150 και 200 ενώ κυμαίνονται οι τιμές της

χωρητικότητας και του αρχικού κόστους της μπαταρίας σε όλο το εύρος τιμών που δώσαμε στην 4.1.3. Φυσικά, η παραπάνω διαδικασία γίνεται και για τα δύο πάρκα.

Πίνακας 4.3: *Annual revenue increase rate. Kapoti Dataset, Ceiling=150*

<b>Capacity\Cost(€/MWh)</b>	<b>200,000</b>	<b>300,000</b>	<b>400,000</b>
40MWh	4.19%	7.37%	11.13%
80MWh	5.20%	9.28%	15.71%
160MWh	5.63%	12.04%	22.64%

Πίνακας 4.4: *Annual revenue increase rate. Kapoti Dataset, Ceiling=200*

<b>Capacity\Cost(€/MWh)</b>	<b>200,000</b>	<b>300,000</b>	<b>400,000</b>
40MWh	2.80%	5.09%	7.90%
80MWh	3.43%	6.67%	10.98%
160MWh	3.49%	7.76%	14.51%

Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες, παρατηρούμε ότι για τιμή του ceiling = 150 το σύνθετο μοντέλο επιτυγχάνει μεγαλύτερη αύξηση των εσόδων συγκριτικά με ceiling = 200. Θυμίζουμε ότι όσο αυξάνεται η τιμή του ceiling, πρόκειται για μία κατά δύναμη πιο προσοδοφόρα κατάσταση της αγοράς. Συνεπώς, μία πιθανή εξήγηση είναι ότι όσο αυξάνεται το ceiling τόσο αυξάνονται τα επιπλέον έσοδα που επιτυγχάνει το απλό μοντέλο. Έτσι, παρότι ως προς τα συνολικά έσοδα (μετά την αφαίρεση της αλλοίωσης) το σύνθετο μοντέλο συνεχίζει να ξεπερνάει το απλό, η διαφορά τους μειώνεται.

Εστιάζοντας τώρα στο πως αλλάζει το ποσοστό αύξησης ενώ αυξάνονται οι τιμές των παραμέτρων της χωρητικότητας και του κόστους της μπαταρίας, οι δύο πίνακες έχουν παρόμοια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το αρχικό κόστος της μπαταρίας, αυξάνεται το ποσό που αφαιρείται εκ των υστέρων από τα έσοδα που προσφέρει το απλό μοντέλο (ενώ όπως θα δούμε και παρακάτω, η αλλοίωση παραμένει σταθερή), με αποτέλεσμα να ανεβαίνει το ποσοστό. Ακόμη, καθώς αυξάνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας, πάλι αυξάνεται το κόστος αγοράς, το οποίο εξηγεί γιατί αυξάνεται και η αύξηση του ποσοστού. Τέλος, παρατηρείται ότι καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει το αρχικό κόστος της μπαταρίας ώστε να γίνει αισθητή η διαφορά των επιδόσεων των μοντέλων σε ετήσια βάση.

Πίνακας 4.5: *Annual revenue increase rate. Mellia Dataset, Ceiling=150*

<b>Capacity\Cost(€/MWh)</b>	<b>200,000</b>	<b>300,000</b>	<b>400,000</b>
40MWh	4.58%	8.01%	12.08%
80MWh	5.55%	10.38%	16.69%
160MWh	6.13%	12.82%	23.75%

Συγκρίνοντας τώρα τους πίνακες για τα δεδομένα από το πάρκο στα Μέλλια τα αποτελέσματα φαίνεται να συμπίπτουν. Τα αντίστοιχα ποσοστά φαίνεται να αυξάνονται κλιμακωτά, αλλά η συμπεριφορά τους είναι η ίδια, επιβεβαιώνοντας τα πορίσματα που διατυπώσαμε.

Κλείνοντας με την σύγκριση των μοντέλων, αποτυπώνουμε τις συνολική αλλοίωση της

Πίνακας 4.6: *Annual revenue increase rate. Mellia Dataset, Ceiling=200*

<b>Capacity\Cost(€/MWh)</b>	<b>200,000</b>	<b>300,000</b>	<b>400,000</b>
40MWh	3.19%	5.76%	8.90%
80MWh	3.65%	7.10%	11.70%
160MWh	3.77%	8.28%	15.31%

μπαταρίας σε βάθος ενός χρόνου για τα δύο διαφορετικά μοντέλα. Σε κάθε κελί του πίνακα, η πρώτη τιμή αντιστοιχεί στο σύνθετο μοντέλο ενώ η δεύτερη στο απλό (διαχωρίζονται με /). Θυμίζουμε ότι όταν η τιμή της αλλοίωσης φτάσει το 1, αυτό υποδεικνύει το EoL της μπαταρίας και πρέπει να αντικατασταθεί. Τα αποτελέσματα συγκλίνουν και πάλι για τα δύο πάρκα, οπότε τα παρουσιάζουμε μόνο για το ένα πάρκο, το πάρκο στα Μέλλια. Σκοπός είναι αφενός να ποσοτικοποιήσουμε την αλλοίωση της μπαταρίας, αφετέρου να συγκρίνουμε τις ποσότητες μεταξύ τους.

Πίνακας 4.7: *Annual Total Degradation. Mellia Dataset, Ceiling=150*

<b>Capacity\Cost(€/MWh)</b>	<b>200,000</b>	<b>300,000</b>	<b>400,000</b>
40MWh	0.083/0.157	0.077/0.157	0.075/0.157
80MWh	0.079/0.124	0.073/0.124	0.075/0.124
160MWh	0.075/0.098	0.072/0.098	0.071/0.098

Πίνακας 4.8: *Annual Total Degradation. Mellia Dataset, Ceiling=200*

<b>Capacity\Cost(€/MWh)</b>	<b>200,000</b>	<b>300,000</b>	<b>400,000</b>
40MWh	0.094/0.159	0.084/0.159	0.079/0.159
80MWh	0.088/0.126	0.079/0.126	0.076/0.126
160MWh	0.080/0.100	0.075/0.100	0.073/0.100

Συγκρίνοντας τους δύο πίνακες ως προς τις διαφορετικές τιμές του ceiling παρατηρούμε ότι για το σύνθετο μοντέλο, καθώς αυξάνεται η τιμή του ceiling αυξάνεται ελαφρώς η αλλοίωση της μπαταρίας. Πιθανότατα, αυτό συμβαίνει διότι το μοντέλο κρίνει ότι μπορεί να επιτύχει αύξηση των εσόδων συγκριτικά με το κόστος λόγω της επιπλέον αλλοίωσης. Ωστόσο, τονίζουμε ότι η αύξηση στην τιμή της αλλοίωσης είναι μικρή, όπως και αναμένεται. Όμοια για το απλό μοντέλο, αύξηση στην τιμή του ceiling συνιστά μικρή και σταθερή αύξηση στην αλλοίωση (ακριβώς 0.002). Ο λόγος είναι ότι σε μία προσοδοφόρα αγορά, γίνεται παραπάνω χρήση της μπαταρίας, το οποίο αυξάνει και την αλλοίωση. Ενδεχομένως, να αναμέναμε μεγαλύτερη αύξηση από αυτή που παρατηρείται για το απλό μοντέλο.

Εστιάζοντας τώρα στο πως αλλάζει η αλλοίωση ενώ αυξάνονται οι τιμές των παραμέτρων, οι δύο πίνακες έχουν πάλι παρόμοια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το αρχικό κόστος της μπαταρίας, για το σύνθετο μοντέλο φαίνεται να μειώνεται σημαντικά η αλλοίωση της μπαταρίας. Άρα, μειώνει την χρήση της μπαταρίας και κατά επέκταση το κόστος λόγω χρήσης. Ακόμη, όσο αυξάνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας πάλι φαίνεται να μειώνεται η αλλοίωση της μπαταρίας το οποίο συνάδει με την λογική μας, αν ακολουθήσουμε την

πορεία σκέψης που μόλις αναφέραμε. Επιπρόσθετα, αναφορικά με το απλό μοντέλο, διαφορετικές τιμές στην αρχική τιμή της μπαταρίας δεν αλλάζουν την αλλοίωση της μπαταρίας (προφανές, καθώς δεν εμπεριέχει το κόστος χρήσης). Τέλος, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε γιατί μειώνεται αισθητά η αλλοίωση της μπαταρίας καθώς αυξάνεται η χωρητικότητά της. Θα αναμέναμε ότι καθώς αυξάνεται η χωρητικότητα της μπαταρίας, θα γίνεται μεγαλύτερη χρήση της μπαταρίας (στρατηγική, αποθήκευση σε χαμηλή, για να πουλήσεις σε υψηλή τιμή), αυξάνοντας έτσι την αλλοίωσή της.

Συμπερασματικά, το σύνθετο μοντέλο, το οποίο λαμβάνει υπόψη την αλλοίωση της μπαταρίας, αποδεικνύεται πιο αποδοτικό σε βάθος χρόνου. Κατά αυτό τον τρόπο, όχι μόνο εξασφαλίζει υψηλότερα ημερήσια έσοδα αλλά και διατηρεί την υγεία της μπαταρίας σε καλύτερη κατάσταση, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη βιωσιμότητα και κερδοφορία της επένδυσης.

### 4.3.2 Απόσβεση

Σε αυτή την ενότητα απαντάμε στο κεντρικό ερώτημα περί βιωσιμότητας. Θυμίζουμε, πως για να είναι η επένδυση βιώσιμη, πρέπει να μπορούμε να αποσβέσουμε την μπαταρία εντός της διάρκειας ζωής.

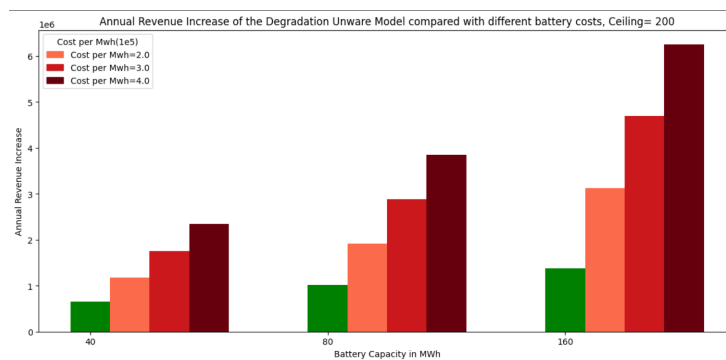
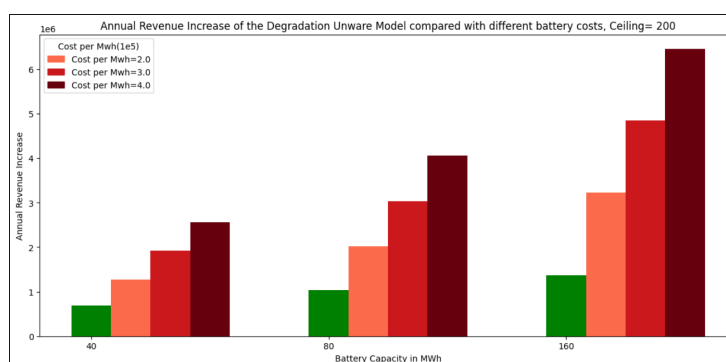
Αρχικά, μελετώντας την απόσβεση για το απλό μοντέλο ακολουθούμε την ακόλουθη διαδικασία. Αναφορικά με τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, υπολογίζουμε την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της βάσει της αλλοίωσης που προκαλείται από το βάθος αποφόρτισης (DoD). Ειδικότερα, τα αναμενόμενα χρόνια της μπαταρίας, δεδομένης της συνολικής ετήσιας αλλοίωσής της, αναφέρονται σε χρόνια, και υπολογίζονται από τον παρακάτω τύπο. Έτσι, επιτυγχάνουμε μία καλύτερη προσέγγιση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας.

$$lifespan = \frac{1}{DP}$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε το ύψος των ετήσιων εσόδων που θα έπρεπε να έχουμε με σκοπό να αποσβέσουμε την μπαταρία πριν φτάσει σε EoL. Αυτό προκύπτει από την διαίρεση του αρχικού κόστους της μπαταρίας με το *lifespan*. Τέλος, συγκρίνοντας με τα επιπλέον ετήσια έσοδα του πάρκου για διαφορετικές αρχικές τιμές της μπαταρίας, ομαδοποιημένα ως προς τις διαφορετικές τιμές της χωρητικότητας της μπαταρίας, προκύπτει το επόμενο *grouped barplot*. Να τονίσουμε ότι για την συγκεκριμένη διαδικασία δεν αφαιρούμε το κόστος λόγω αλλοίωσης της μπαταρίας. Τα δύο γραφήματα αφορούν τα δύο διαφορετικά πάρκα, όπου και για τα δύο θεωρούμε ότι *ceiling* = 200.

Αρχικά παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα για τα δύο διαφορετικά πάρκα φαίνεται να είναι πανομοιότυπα. Στον οριζόντιο άξονα, οι τιμές είναι ομαδοποιημένες ανάλογα με τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Για κάθε χωρητικότητα, παρουσιάζονται τέσσερις μπάρες: η πρώτη (πράσινη) αντιπροσωπεύει τα ετήσια επιπλέον έσοδα, ενώ οι υπόλοιπες δείχνουν τα ετήσια έσοδα που θα έπρεπε να έχουμε για διαφορετικές αρχικές τιμές της μπαταρίας. Στον κατακόρυφο άξονα απεικονίζονται τα ποσά σε χρήματα. Τα αποτελέσματα δεν είναι ενθαρρυντικά. Για όλες τις διαφορετικές αρχικές τιμές της μπαταρίας και για όλες τις χωρητικότητες, δεν επιτυγχάνεται απόσβεση.



Σχήμα 4.3: *Depreciation Kap, Unaware, Ceiling=200*Σχήμα 4.4: *Depreciation Mel, Unaware, Ceiling=200*

Επιπλέον, εξετάσαμε την απόσβεση και μέσω του σύνθετου μοντέλου. Η αξιολόγηση στο σύνθετο μοντέλο γίνεται με πιο απλό τρόπο, αφού κατά την χρήση της έχουμε αφαιρέσει σταδιακά το κόστος και κατά επέκταση έχουμε συνυπολογίσει τη διάρκεια ζωής της. Για να υπολογίσουμε το ετήσιο κέρδος, αφαιρούμε τα έσοδα του σύνθετου μοντέλου από την παραγωγή του πάρκου χωρίς τη μπαταρία. Αυτό μας δίνει το καθαρό ετήσιο κέρδος. Εάν τα κέρδη είναι αρνητικά, η επένδυση δεν είναι βιώσιμη. Για όλες τις διαφορετικές παραμέτρους, τα κέρδη παραμένουν αρνητικά. Τα τελευταία αποτελέσματα που προκύπτουν από το σύνθετο μοντέλο, δεν τα αποτυπώσαμε με κάποιο τρόπο αλλά τα χρησιμοποιήσαμε για την εξαγωγή της επόμενης φάσης της έρευνάς μας. Συνοψίζοντας μέχρι στιγμής, η τρέχουσα ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα, σε συνδυασμό με το αρχικό κόστος της μπαταρίας, δεν επιτρέπουν τη βιωσιμότητα της επένδυσης.

Εξετάζουμε, λοιπόν, υπό ποιες συνθήκες θα γινόταν η επένδυση βιώσιμη. Προς αυτή την κατεύθυνση, κατασκευάζουμε τον παρακάτω πίνακα. Κάθε θέση στον πίνακα εκφράζει το ποσοστό επί του αρχικού κόστους της μπαταρίας που δεν καταφέρνουμε να αποσβέσουμε στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Για παράδειγμα κοιτώντας τον πρώτο πίνακα, για χωρητικότητα 40MWh και κόστος ανά μονάδα 200,000 €, το ποσοστό είναι 49% (σχεδόν 50%). Το κόστος αγοράς είναι 8 εκατομμύρια ( $40 \cdot 200,000$ ). Άρα, υπολείπονται περίπου τα μισά χρήματα για να είναι η επένδυση βιώσιμη (4 εκ.). Η αξία του συγκεκριμένου πίνακα βρίσκεται στο ότι μας δίνει μία εικόνα για το ύψος της επιχορήγησης που θα χρειαζόταν για

να γίνουν βιώσιμες οι μπαταρίες. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα έχει νόημα καθώς τα ΑΠΕ δέχονται διαρκώς μεγάλα ποσά επιχορήγησης παγκοσμίως.

Εξηγούμε τον τρόπο κατασκευής των παρακάτω πινάκων. Αρχικά ως προς τις παραμέτρους, σε κάθε πίνακα, η χωρητικότητα και το αρχικό κόστος της μπαταρίας βρίσκονται και πάλι σε όλο το εύρος τιμών τους, ενώ αλλάζουν οι τιμές του ceiling και το πάρκο. Για όλα τα αποτελέσματα έγινε χρήση του μοντέλου που λαμβάνει υπόψιν την αλλοίωση της μπαταρίας, μιας και δείξαμε παραπάνω ότι τα πηγαίνει καλύτερα από το απλό. Ακόμη, όπως και σε προηγούμενα αποτελέσματα, επιθυμούμε να συγκλίνουν τα αποτελέσματα για τα διαφορετικά πάρκα, εξετάζοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, εξετάζουμε ως προς τις τιμές του ceiling 150,200 για να αποτυπώσουμε τα συμπεράσματα για διαφορετικές καταστάσεις της αγοράς. Στη συνέχεια, ως προς το περιεχόμενο, κάθε κελί προέκυψε από την ακόλουθη διαδικασία. Πρώτα βρίσκουμε το απόλυτο του ετήσιου κέρδους (είναι σε όλες τις περιπτώσεις αρνητικό). Μετά υπολογίζουμε το lifespan της μπαταρίας βάσει του DoD. Τέλος, βρίσκουμε τα συνολικά χρήματα που δεν αποσβενόμαστε ως γινόμενο των προηγούμενων δύο ποσοτήτων και το διαιρούμε με το αρχικό κόστος.

Εστιάζουμε λοιπόν στους πρώτους δύο πίνακες όπου αφορούν το ίδιο πάρκο αλλά διαφορετικές τιμές του ceiling. Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνονται είτε το κόστος μπαταρίας είτε η χωρητικότητα αυξάνεται και το ποσοστό. Η αύξηση του κόστους συνεπάγεται κατά προφανή τρόπο την αύξηση του ποσοστού. Η αύξηση της χωρητικότητας συνεπάγεται επίσης την αύξηση του ποσοστού ενώ το αρχικό της κόστος παραμένει σταθερό. Συνεπώς, ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται το κόστος όσο αυξάνεται η χωρητικότητα είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό που αυξάνονται τα έσοδα. Κλείνοντας, συγκρίνοντας τους δύο πίνακες μεταξύ τους, τα αποτελέσματα είναι και τα αναμενόμενα. Μεγαλύτερη τιμή του ceiling συνεπάγεται μία πιο προσοδοφόρα αγορά το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του ποσοστού.

Πίνακας 4.9: *Grant Amount for different costs and capacities of the battery Kapoti Dataset, Ceiling=150*

<b>Capacity\Cost(€/MWh)</b>	<b>200,000</b>	<b>300,000</b>	<b>400,000</b>
40MWh	49%	69%	78%
80MWh	58%	75%	82%
160MWh	70%	82%	87%

Πίνακας 4.10: *Grant Amount for different costs and capacities of the battery Kapoti Dataset, Ceiling=200*

<b>Capacity\Cost(€/MWh)</b>	<b>200,000</b>	<b>300,000</b>	<b>400,000</b>
40MWh	25%	54%	69%
80MWh	38%	62%	74%
160MWh	54%	72%	81%

Πίνακας 4.11: *Grant Amount for different costs and capacities of the battery Mellia Dataset, Ceiling=150*

Capacity\Cost(€/MWh)	200,000	300,000	400,000
40MWh	48%	69%	79%
80MWh	60%	76%	84%
160MWh	72%	84%	89%

Πίνακας 4.12: *Grant Amount for different costs and capacities of the battery Mellia Dataset, Ceiling=200*

Capacity\Cost(€/MWh)	200,000	300,000	400,000
40MWh	25%	54%	69%
80MWh	39%	63%	76%
160MWh	56%	74%	83%

### 4.3.3 Competitive ratio

Θυμίζουμε, ότι ο τρόπος με τον οποίο προκύπτουν τα έσοδα ετησίως είναι υλοποιώντας ένα MILP κάθε μέρα για διάστημα ενός χρόνου. Ανακύπτει λοιπόν το εξής ερώτημα, πόσο θα μπορούσαν να αυξηθούν τα έσοδά μας αν γνωρίζαμε πληροφορίες και για τις επόμενες ημέρες. Για παράδειγμα, αν γνωρίζαμε με μεγάλη βεβαιότητα τα προγνωστικά για παραγωγή και τις τιμές αγοραπωλησίας:

Αυτό που θέλουμε λοιπόν να υπολογίσουμε είναι τον λόγο των εσόδων υλοποιώντας τον αλγόριθμο για κάθε μέρα ξεχωριστά (όπως κάνουμε τώρα) προς τα έσοδα υλοποιώντας τον αλγόριθμο με πληροφορία όλων των ημερών (μία φορά). Στην βιβλιογραφία αυτό ονομάζεται *competitive ratio* και είναι μία μετρική για να συγκρίνουμε την επίδοση του αλγορίθμου μας.

Παραθέτουμε λοιπόν τον επόμενο πίνακα, ο οποίος μας δίνει μία εικόνα, προσεγγίζει, το *competitive ratio*. Η προσέγγιση έγινε για διαφορετικό αριθμό πρότερης γνώσης και υπολογίστηκε η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη τιμή του λόγου των δύο αλγορίθμων. Ειδικότερα, δεδομένης της πρότερης γνώσης, υλοποιήσαμε τους αλγορίθμους για διαφορετικές χρονικές περιόδους μέσα στον χρόνο. Στις γραμμές του πίνακα, αυξάνεται ο αριθμός της πρότερης γνώσης (ημερών μποροστά), ενώ στις στήλες βρίσκονται η ελάχιστη, η μέση και η μέγιστη τιμή του *competitive ratio*.

Πίνακας 4.13: *Competitive ratio for varying forecast horizons*

Forecast \ Metrics	Min	Mean	Max
3	99%	99.9%	100%
7	98.5%	99.8%	100%
15	98.6%	99.5%	100%



### Επίλογος

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για την αποτελεσματική διαχείριση της μπαταρίας, με ταυτόχρονη εξασφάλιση της μακροζωίας της. Δημιουργήθηκε από την αρχή ένα Μικτό Ακέραιο Γραμμικό Πρόγραμμα (ΜΙΛΠ) που στοχεύει στη μεγιστοποίηση των εσόδων και στη μείωση του κόστους χρήσης της μπαταρίας. Το μοντέλο αυτό είναι πολυδιάστατο και δέχεται ως είσοδο δεδομένα όπως η παραγωγή του αιολικού πάρκου, οι τιμές αγοραπωλησίας ενέργειας (DAM), τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας και του πάρκου, καθώς και παράγοντες που σχετίζονται με την τρέχουσα ενεργειακή κατάσταση. Ως αποτέλεσμα, το μοντέλο παρέχει τη βέλτιστη κατανομή της ενέργειας, αξιοποιώντας κατάλληλα τη μπαταρία και μεγιστοποιώντας τα έσοδα του πάρκου. Με βάση την εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα και την ανάλυση ευαισθησίας, είμαστε σε θέση να εξαγάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα.

#### 5.1 Αξιολόγηση Μοντελοποίησης Φθοράς της Μπαταρίας

Με βάση τα αποτελέσματα του 4.3.1, επιβεβαιώνεται η αναγκαιότητα της μοντελοποίησης της φθοράς της μπαταρίας. Σε όλα τα πειράματα, τα συνολικά έσοδα του πλήρους μοντέλου, το οποίο λαμβάνει υπόψη την αλλοίωση της μπαταρίας, υπερέβαιναν εκείνα του απλούστερου μοντέλου που στοχεύει μόνο στη μεγιστοποίηση των εσόδων. Συνεπώς, συμπεραίνουμε ότι είναι εφικτή η αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας χωρίς να μειώνονται σημαντικά οι οικονομικές απολαβές.

#### 5.2 Βιωσιμότητα Επένδυσης

Τη βιωσιμότητα της επένδυσης εξετάσαμε στο 4.3.2, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές διαστάσεις της μπαταρίας, καταστάσεις του συστήματος και δύο διαφορετικά σύνολα δεδομένων. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν υψηλό βαθμό σύμπτωσης, ενισχύοντας την αισιοδοξία μας για τα συμπεράσματα. Συμπεραίνουμε ότι, με την παρούσα ενεργειακή κατάσταση στην Ελλάδα και τα σημερινά κόστη αγοράς μπαταριών λιθίου, το πάρκο δεν αναμένεται να αποσβέσει την επένδυση.

Στη συνέχεια, προχωρήσαμε στην ποσοτικοποίηση του ύψους του κεφαλαίου που απαιτείται για να καταστεί η επένδυση βιώσιμη. Όσον αφορά την κατάλληλη διαστασιολόγηση, διαπιστώθηκε ότι μια μπαταρία με την ελάχιστη χωρητικότητα (40MWh) βρίσκεται πιο κο-

νά στην απόσβεση της επένδυσης συγκριτικά με μπαταρίες μεγαλύτερης χωρητικότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα επιπλέον έσοδα που επιτυγχάνει το πάρκο με μπαταρία μεγαλύτερης χωρητικότητας δεν αντισταθμίζουν το αυξημένο κόστος αγοράς τους.

### **5.3 Μελλοντική εργασία**

Σε μελλοντική εργασία θα θέλαμε να εμπλουτίσουμε το μοντέλο μας ώστε να είναι δυνατή η πρόγνωση της παραγωγής του πάρκου (forecasting) [7]. Επιπλέον, θα θέλαμε να συμπεριλάβουμε περισσότερους παράγοντες που επηρεάζουν την αλλοίωση της μπαταρίας, όπως η θερμοκρασία και το current [13]. Τέλος, θα μπορούσαμε να εξετάσουμε αλληλεπίδρασης μεταξύ οχημάτων και δικτύου (V2G/G2V) στο έξυπνο δίκτυο, όπως γίνεται στο [24].

## Βιβλιογραφία

---

- [1] Giacomo Talluri, Gabriele Maria Lozito, Francesco Grasso, Carlos Iturrino Garcia και Antonio Luchetta. *Optimal Battery Energy Storage System Scheduling within Renewable Energy Communities*. *Energies*, 14(24), 2021.
- [2] Semich Impram, Secil Varbak Nese και Bülent Oral. *Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey*. *Energy Strategy Reviews*, 31:100539, 2020.
- [3] M.A. Hannan, S.B. Wali, P.J. Ker, M.S. Abd Rahman, M. Mansor, V.K. Ramachandaramurthy, K.M. Muttaqi, T.M.I. Mahlia και Z.Y. Dong. *Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues*. *Journal of Energy Storage*, 42:103023, 2021.
- [4] Giuliano Rancilio, Alexandre Lucas, Evangelos Kotsakis, Gianluca Fulli, Marco Merlo, Maurizio Delfanti και Marcelo Masera. *Modeling a Large-Scale Battery Energy Storage System for Power Grid Application Analysis*. *Energies*, 12(17), 2019.
- [5] Marco Stecca, Laura Ramirez Elizondo, Thiago Batista Soeiro, Pavol Bauer και Peter Palensky. *A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks*. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 1:46–65, 2020.
- [6] Safat Bin Wali, M.A. Hannan, M.S. Reza, Pin Jern Ker, R.A. Begum, M.S. Abd Rahman και M. Mansor. *Battery storage systems integrated renewable energy sources: A bibliometric analysis towards future directions*. *Journal of Energy Storage*, 35:102296, 2021.
- [7] Fengji Luo, Ke Meng, Zhao Yang Dong, Yu Zheng, Yingying Chen και Kit Po Wong. *Coordinated Operational Planning for Wind Farm With Battery Energy Storage System*. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6(1):253–262, 2015.
- [8] Ying Wang, Zhi Zhou, Audun Botterud, Kaifeng Zhang και Qia Ding. *Stochastic coordinated operation of wind and battery energy storage system considering battery degradation*. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 4, 2016.
- [9] Choton K. Das, Octavian Bass, Ganesh Kothapalli, Thair S. Mahmoud και Daryoush Habibi. *Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality*, 2018.

- [10] Matthew T. Lawder, Bharatkumar Suthar, Paul W. C. Northrop, Sumitava De, C. Michael Hoff, Olivia Leitermann, Mariesa L. Crow, Shriram Santhanagopalan και Venkat R. Subramanian. *Battery Energy Storage System (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications*. *Proceedings of the IEEE*, 102(6):1014–1030, 2014.
- [11] *Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application*. *Journal of Energy Storage*, 40, 2021.
- [12] M.S. Reza, M.A. Hannan, Pin Jern Ker, M. Mansor, M.S. Hossain Lipu, M.J. Hossain και T.M. Indra Mahlia. *Uncertainty parameters of battery energy storage integrated grid and their modeling approaches: A review and future research directions*. *Journal of Energy Storage*, 68:107698, 2023.
- [13] Noshin Omar, Mohamed Abdel Monem, Yousef Firouz, Justin Salminen, Jelle Smeckens, Omar Hegazy, Hamid Gaulous, Grietus Mulder, Peter Vanden Bossche, Thierry Coosemans και Joeri Van Mierlo. *Lithium iron phosphate based battery - Assessment of the aging parameters and development of cycle life model*. *Applied Energy*, 113, 2014.
- [14] Cem Keske, Arvind Srinivasan, Giovanni Sansavini και Paolo Gabrielli. *Optimal economic and environmental arbitrage of grid-scale batteries with a degradation-aware model*. *Energy Conversion and Management: X*, 2024.
- [15] Juan Pablo Vielma και George L. Nemhauser. *Modeling disjunctive constraints with a logarithmic number of binary variables and constraints*. *Mathematical Programming*, 128, 2011.
- [16] Raymond Byrne, Tu Nguyen, David Copp, Babu Chalamala και Imre Gyuk. *Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems*. *IEEE Access*, 3:1–1, 2017.
- [17] Chunyang Zhao, Peter Bach Andersen, Chresten Træholt και Seyedmoustafa Hashemi. *Grid-connected battery energy storage system: a review on application and integration*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182:113400, 2023.
- [18] Tu Nguyen και M.L. Crow. *Stochastic Optimization of Renewable-Based Microgrid Operation Incorporating Battery Operating Cost*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31:2289 – 2296, 2015.
- [19] Farihan Mohamad, Jiashen Teh και Ching Ming Lai. *Optimum allocation of battery energy storage systems for power grid enhanced with solar energy*. *Energy*, 223:120105, 2021.
- [20] Johannes Schmalstieg, Stefan Käbitz, Madeleine Ecker και Dirk Uwe Sauer. *A holistic aging model for Li(NiMnCo)O<sub>2</sub> based 18650 lithium-ion batteries*. *Journal of Power Sources*, 257:325–334, 2014.



- 
- [21] Shuangqi Li, Pengfei Zhao, Chenghong Gu, Jianwei Li, Da Huo και Shuang Cheng. *Aging Mitigation for Battery Energy Storage System in Electric Vehicles*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 14(3):2152–2163, 2023.
- [22] Jin Oh Lee και Yun Su Kim. *Novel battery degradation cost formulation for optimal scheduling of battery energy storage systems*. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 137, 2022.
- [23] Jin Choi, Shin Heo και Mun Kyeom Kim. *Hybrid operation strategy of wind energy storage system for power grid frequency regulation*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10:736–749, 2016.
- [24] Nikolaos I. Spanoudakis, Charilaos Akasiadis, Georgios Iatrakis και Georgios Chalkiadakis. *Engineering IoT-Based Open MAS for Large-Scale V2G/G2V*. *Systems*, 11(3), 2023.